

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

**SIMULATIONS DE L'ACCUMULATION DE GLACE SUR
UN CYLINDRE**

CAS TEST POUR LE GIVRAGE DES ÉOLIENNES

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître en sciences appliquées
(M. Sc. A.)

PAR

© **FAHED MARTINI**

Sous la supervision de

Adrian Ilinca

Novembre 2012

Composition du jury :

Hussein Ibrahim, Ph.D., M.Sc.A., président du jury, professeur invité UQAR

Adrian Ilinca, directeur de recherche, professeur

Mariya Dimitrova, M.Sc.A., membre externe, TechnoCentre Éolien

Dépôt initial le 11 Décembre 2011

Dépôt final le 26 Novembre 2012

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

À mon fils Adonis

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à exprimer ma plus sincère gratitude à mon directeur de recherche, Adrian Ilinca, professeur au département de mathématiques, d'informatique et de génie et directeur du Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE) à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce sujet de recherche, ainsi que pour sa gentillesse et pour son soutien et encouragement tout au long de mon travail.

Je remercie également tous le personnel du TechnoCentre Éolien pour leur assistance et accueil à Murdochville et tous spécialement le directeur scientifique Hussein Ibrahim pour ses conseils précieux.

Un gros merci à tous mes collègues, les étudiants de maîtrise à l'UQAR avec qui j'ai passé des moments inoubliables, notamment: Sorin Minea, Drishty Ramdennee et René Corral. Je n'oublie pas non plus votre support.

Des remerciements aussi à la ville de Rimouski pour le milieu universitaire très agréable et à toutes les personnes du département de mathématiques, d'informatique et de génie à l'UQAR pour leur accueil et collaboration.

Finalement, je remercie ma famille et mes amis en Syrie pour leur encouragement et je remercie chaleureusement ma femme, Sawsan, et mon fils, Adonis, pour tout l'amour qu'ils m'offrent et pour avoir enduré avec patience et compréhension mon absence à la maison pendant les études.

AVANT-PROPOS

Ce travail de maîtrise a été réalisé au Laboratoire de Recherche en Energie Eolienne (LREE) à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR). Il est présenté sous la forme d'un mémoire par articles. Le premier chapitre consiste en une introduction générale du problème du givrage des éoliennes dans les milieux nordiques avec revue de littérature. Ainsi, la théorie et les logiciels réalisés et reliés à cette étude sont présentés afin de définir le projet dans le contexte de l'état de l'art du givrage des éoliennes et afin d'apporter au lecteur un supplément d'information sur le sujet d'étude. Les deux articles qui sont publiés au « *IEEE eXplore - 2011 Electrical Power and Energy Conference* » constituent les deuxième et troisième chapitres. Le quatrième chapitre présente la conclusion générale et les recommandations.

RÉSUMÉ

Ce projet s'inscrit dans des études à approfondir la connaissance du givrage afin d'adapter les éoliennes pour opérer dans les conditions nordiques. L'objectif principal est de développer des techniques pour évaluer, à long terme, l'impact du givrage sur le fonctionnement d'un projet éolien et d'optimiser des techniques de dégivrage.

Plusieurs études complexes doivent être effectuées avant de proposer un modèle précis capable de réaliser une simulation tridimensionnelle du givrage sur des pales des éoliennes en rotation. Pour atteindre les objectifs, nous avons utilisé des logiciels commerciaux de CFD et l'interface conviviale de MS-Excel pour valider un cas test des simulations de l'accumulation de glace sur un cylindre. Ces méthodes sont destinées à être appliquées à la simulation en 3D de l'accumulation de glace sur les éoliennes, étant donné que l'étude du givrage du cylindre, pour lequel des résultats analytiques et expérimentaux nombreux sont disponibles pour validation, est fondamentale et pré-requis pour ce domaine de recherche.

La capacité d'un objet à capturer des gouttelettes d'eau dans un écoulement est appelé l'efficacité de collection. Une évaluation de l'efficacité de collection sur un cylindre a été simulée en utilisant une approche Eulérienne basée sur les modèles de turbulence multiphasiques dans ANSYS-CFX. Les résultats ont été validés avec des résultats des approches Lagrangiennes et Eulériennes dans FLUENT ainsi qu'avec des résultats expérimentaux obtenus à partir d'études antérieurs. Les résultats ont démontré l'efficacité des modèles multiphasiques du logiciel CFX à simuler les fractions volumiques d'eau et à définir la zone de collection et les limites d'impact autour du cylindre. Pareillement, un logiciel pour calculer les trajectoires des gouttelettes d'eau dans un écoulement d'air interceptées par un cylindre a été réalisé sous Excel avec un code VBA (Visual Basic for Applications). Cette interface permet de démontrer les différents scénarios pouvant aider à valider les simulations avec CFX. Les deux simulations réalisées avec Excel et CFX ont démontré une cohérence entre le comportement des lignes de courant, des trajectoires et des forces agissant sur les gouttelettes.

Mots clés : Givrage, accumulation de glace, approche Lagrangienne / Eulérienne, CFX, gouttelettes d'eau, énergie éolienne.

ABSTRACT

This project has been conducted in the context of intensifying the knowledge of icing on wind turbines to be adapted in Nordic conditions. The main objective is to develop techniques to evaluate the long-term impact of icing on the performance of wind turbine projects and to optimize the de-icing techniques.

Several upstream complex studies are to be conducted prior to propose a precise model capable of achieving a three-dimensional simulation of icing on wind turbine rotating blades. In order to overcome these difficulties, we made use of the high capacity of commercial CFD software, together with the friendly user interface of MS-Excel. The validation of these tools for the ice accretion past a cylinder is the prerequisite for applying these tools for the 3D simulation of icing over wind turbines, given that the study of cylinder icing is fundamental in several areas of icing research.

The ability of an object to capture water droplets presented in an air flow is called collection efficiency. Evaluation of the collection efficiency over a cylinder has been simulated using Eulerian approach based on multi-phase turbulence models in CFX. The results have been validated with those of Lagrangian and Eulerian approaches in FLUENT as well as with experimental results obtained from previous studies. The results showed that the use of ANSYS-CFX multi-phase models was effective in simulating water volume fractions through the domain and in defining the collection zone and the impingement limits around the cylinder. In addition, a code to calculate the trajectories of supercooled water droplets in the air intercepted by a cylinder has been achieved using MS-Excel sheets supported with VBA (Visual Basic for Applications). This interface has been used to demonstrate different scenarios that can help to validate similar simulations using CFX. In both Excel and CFX simulations, the streamlines and trajectories have demonstrated similar behaviour which is consistent with the forces acting on water droplets.

Keywords: Icing, Ice accretion, Lagrangean/Eulerian approach, CFX, water droplets, wind energy.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-------------|
| REMERCIEMENTS..... | IX |
| AVANT-PROPOS | XI |
| RÉSUMÉ..... | XIII |
| ABSTRACT | XV |
| TABLE DES MATIÈRES | XVII |
| LISTE DES FIGURES..... | XIX |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES | XXI |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE | 1 |
| 1.1 MISE EN SITUATION | 1 |
| 1.2 PROBLEMATIQUE..... | 2 |
| 1.3 OBJECTIFS | 3 |
| 1.4 METHODOLOGIE | 5 |
| 1.5 L'ETAT DE L'ART DU GIVRAGE..... | 7 |
| 1.5.1 LES PRINCIPAUX PARAMETRES AFFECTANT L'ACCRETION DE GLACE | 7 |
| 1.5.2 L'EFFICACITE DE LA COLLECTION | 8 |
| 1.5.3 LES REGIMES DE L'ACCUMULATION DE GLACE..... | 9 |
| 1.5.4 LES MODELES NUMERIQUES DE L'ACCRETION DE GLACE..... | 10 |
| 1.6 SIMULATIONS NUMERIQUES DE L'ECOULEMENT D'AIR ET L'ACCUMULATION DE GLACE AUTOUR D'UN CYLINDRE | 13 |
| 1.6.1 L'APPROCHE EULERIENNES AVEC CFX POUR L'ESTIMATION DE L'EFFICACITE DE COLLECTION | 14 |

| | |
|---|----|
| 1.6.2 CALCUL DES TRAJECTOIRES DES GOUTTELETTES D'EAU AVEC UNE APPROCHE LAGRANGIENNE | 16 |
| CHAPITRE 2 UNE APPROCHE CFX MULTIPHASE POUR LA MODELISATION DE L'ACCRETION DE GLACE SUR UN CYLINDRE..... | 17 |
| 2.1 RESUME DU PREMIER ARTICLE..... | 17 |
| CHAPITRE 3 UNE INTERFACE INTERACTIVE LAGRANGIENNE POUR MODELISER L'ACCRETION DE GLACE SUR UN CYLINDRE - CAS DE TEST POUR LA MODELISATION DU GIVRAGE SUR DES PROFILS D'EOLIENNES | 31 |
| 3.1 RESUME DU DEUXIEME ARTICLE | 31 |
| CHAPITRE 4 CONCLUSION GÉNÉRALE..... | 45 |
| 4.1 BILAN ET AVANCEMENT DES CONNAISSANCES..... | 45 |
| 4.2 LIMITATIONS DE LA RECHERCHE | 48 |
| 4.3 TRAVAUX FUTURS..... | 48 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 51 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1. Les coefficients aérodynamiques de portance et de traînée du profil givré et non-givré en fonction de la position radiale sur la pale (Hochart C., 2006) | 3 |
| Figure 2. Le plan intégral d'études pour arriver à une simulation tridimensionnelle de l'accrétion de glace | 6 |
| Figure 3. Définition de l'efficacité de collection | 8 |
| Figure 4. L'efficacité de la collection locale sur un cylindre par rapport à l'angle de l'incidence | 8 |
| Figure 5. Le régime sec (le givre) | 9 |
| Figure 6. Le régime humide (le verglas) | 10 |
| Figure 7. Les lignes de courant de l'écoulement potentiel autour d'un cylindre circulaire discrétisée par des panneaux | 13 |
| Figure 8. Cylindre représentant un profil $D = 0.03 C$ | 14 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

| | |
|---|--|
| ρ | La densité de l'air en kg/m^3 |
| S | La surface traversée par le vent en m^2 |
| V | La vitesse de vent en m/s |
| P | La puissance disponible dans le vent |
| r | Position radiale sur la pale en m |
| E | L'efficacité de la collection |
| β | L'efficacité de la collection locale |
| T_{surface} | La température de la surface |
| $T_{\text{solidification}}$ | La température de la solidification |
| T_a | La température de l'air |
| f | La fraction solide |
| D | Diamètre du cylindre |
| C | Corde du profile aérodynamique |

| | |
|---------------|---|
| L.L. | La Limite de Ludlam |
| CD | Coefficient de traînée |
| CL | Coefficient de portance |
| LWC | Teneur en eau liquide en kg/m ³ (Liquid Water Content) |
| LREE | Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne |
| MVD | Diamètre volumétrique médian de la distribution des gouttelettes d'eau en μm |
| AOA | Angle Of Attack |
| APDL | ANSYS Parametric Design Language |
| FENSAP | Finite Elements Naveir-Stocks Analysis Package |
| CEL | CFX Expression Language |
| AMIL | Anti Icing Materials International Laboratory |
| LIMA | Laboratoire International Des Matériaux Antigivre |
| CIRA | Centre Italien de Recherche Aéronautique |
| AIAA | American Institute of Aeronautics and Astronautics |
| CFD | Mécanique des fluides numérique (Computational Fluid Dynamics) |
| CAO | Conception Assistée par Ordinateur |

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 MISE EN SITUATION

De jour en jour, la nécessité d'utiliser des ressources alternatives aux sources traditionnelles d'énergie augmente progressivement afin de réduire le taux d'émission des gaz à effet de serre. L'énergie éolienne est une source importante d'énergie particulièrement dans les pays nordiques où le potentiel éolien est très élevé.

$$\text{La puissance disponible dans le vent: } P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3$$

Où ρ est la densité de l'air en kg/m^3 , S est la surface balayée par le rotor en m^2 et V est la vitesse du vent en m/s . Cette relation montre que la puissance disponible dans le vent dépend du cube de la vitesse. En raison de l'augmentation de la densité de l'air et de la vitesse du vent en milieux nordiques, la production éolienne en hiver est la plus élevée au cours de l'année. Cependant, les très basses températures et le phénomène de l'accumulation de glace en hiver affectent négativement le fonctionnement des turbines éoliennes (Parent & Ilinca, 2010). Généralement, la formation de glace sur les structures cause des dommages matériels et des risques pour la sécurité humaine. Dans le cas des éoliennes, des pertes de puissance annuelles sont également imposées à cause du givrage dans des milieux qui ont un potentiel très élevé en hiver. Le Québec et le Canada sont particulièrement affectés par ces conditions d'exploitation nordiques ainsi que d'autres pays comme la Suisse, l'Autriche et la zone des Alpes en France. A ces endroits, les problèmes dus au givre et aux basses températures sont malheureusement très fréquents et ils sont

beaucoup plus importants qu'on a estimé lors des études de faisabilité des parcs éoliens (Ilinca & Chaumel, Conférence de l'énergie éolienne, 2009).

1.2 PROBLÉMATIQUE

Le givrage est un problème complexe dont la résolution fait appel à plusieurs domaines de connaissance comme la météorologie, les statistiques, la dynamique des fluides et la thermodynamique. La particularité du givrage liée à l'eau en surfusion, ce qui provoque des phénomènes complexes de changement de phase. La surfusion est un cas métastable de fluide où l'eau reste liquide jusqu'à $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ si elle ne rencontre pas de noyau de congélation, alors que sa température est plus basse que son point de congélation.

Les désavantages liés au problème du givrage des éoliennes peuvent être identifiés dans la littérature comme étant:

- De la fatigue provoquée par des vibrations et des charges dynamiques ce qui augmente le coût de l'entretien et réduit la rentabilité totale d'un projet éolien (Ilinca & Chaumel, Conférence de l'énergie éolienne, 2009)
- Des problèmes de sécurité reliés aux dangers résultants des immenses dépôts de glace qui peuvent être projetés très loin des pales (Mayer, 2007).
- La présence de givre sur les pales diminue considérablement les performances du rotor et les très basses températures provoquent des bris mécaniques et électriques (Hochart C. , 2006).
- Une réduction de performance en raison de la rugosité et des déformations du profil aérodynamique des pales des éoliennes qui influence significativement la puissance des éolienne et leur production annuelle d'énergie (Fortin, Hochart, Perron, & Ilinca, 2005). L'influence du givrage sur la diminution de la finesse aérodynamique du profil est illustrée à la Figure 1.

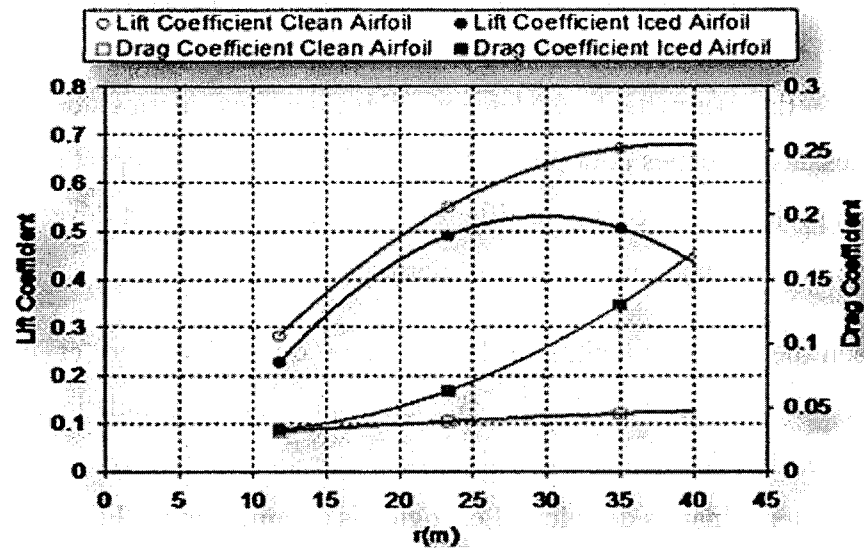


Figure 1. Les coefficients aérodynamiques de portance et de traînée du profil givré et non-givré en fonction de la position radiale sur la pale (Hochart C., 2006)

Le manque de connaissances reliées au phénomène du givrage et la faible rentabilité des systèmes antigivrage existants, nous obligent actuellement à arrêter les éoliennes pendant des jours qui peuvent être particulièrement venteuses (Ilinca & Chaumel, Conférence de l'énergie éolienne, 2009).

1.3 OBJECTIFS

L'impact du givrage est difficile à quantifier sans des essais expérimentaux et des simulations numériques. Le coût des essais en soufflerie étant élevé, une approche par simulations numériques permet de fournir rapidement des informations sur la diminution des performances aérodynamiques et énergétiques selon différentes configurations d'éoliennes et des conditions météorologiques. Combiner des mesures météorologiques nombreuses et précises à des modèles numériques puissants est essentiel pour évaluer adéquatement l'impact du givrage sur le fonctionnement d'une éolienne et sa production annuelle (DIMITROVA, 2009). Une simulation tridimensionnelle de l'écoulement de l'air

et de l'accrétion de la glace autour des pales des éoliennes est indispensable à la conception des systèmes de dégivrage adaptés aux formes et aux masses des dépôts de glace accumulés sur les pales. Ils permettent également d'évaluer les pertes de performances aérodynamiques des éoliennes pour pouvoir évaluer à long terme l'impact du givrage sur la rentabilité d'un projet éolien, ce que justifie les efforts de recherche et développement pour adapter les turbines éoliennes aux conditions nordiques.

En raison de la complexité de la physique du phénomène et des exigences informatiques, il est très difficile à accomplir des simulations numériques tridimensionnelles de l'écoulement de l'air et de l'accrétion de la glace sur les pales et le rotor selon plusieurs scénarios de calcul. Les logiciels commerciaux CFD ont démontré leur grande capacité à simuler des phénomènes complexes dans divers domaines d'application. L'utilisation d'un code commercial pas spécialisé dans le domaine d'étude doit être validée avec des études fondamentales sur le givrage avant d'être utilisé pour simuler l'accumulation de glace sur les éoliennes dans des diverses conditions atmosphériques. Vu que l'étude du givrage sur le cylindre est fondamentale pour plusieurs domaines de recherche, ce projet va donc reprendre ces études théoriques de l'accumulation de glace autour d'un cylindre en appliquant une approche Eulérienne avec le logiciel ANSYS-CFX, puis, analyser cette application avec des calculs des trajectoires des gouttelettes d'eau et valider la méthode avec des résultats numériques et expérimentaux. L'atteinte de cet objectif nous permet de faire une première validation d'outils numériques de simulation du givrage basés sur des logiciels commerciaux à application générale. Dans les travaux futurs il sera possible de faire, avec ces mêmes outils, des simulations numériques tridimensionnelles de l'écoulement de l'air et de l'accrétion de la glace autour des pales d'éolienne. Les autres éléments qui sont validés dans ce travail portent sur l'estimation des déformations géométriques et seront utilisés, par la suite, pour estimer l'impact du givre sur les performances aérodynamiques. Ultimement, les performances aérodynamiques modifiées par l'accumulation de glace vont nous permettre d'évaluer les pertes de production d'un parc éolien.

1.4 MÉTHODOLOGIE

Les calculs de l'accrétion de glace doivent suivre des itérations dans le temps sur la durée de l'événement de givrage. A chaque itération il y a quatre étapes de calcul pour déterminer l'accumulation de glace:

1. La solution des équations de Navier-Stokes dans le champ de l'écoulement et dans la couche limite pour déterminer les vitesses et pressions de l'air dans le voisinage du corps étudié;
2. La détermination du coefficient de l'efficacité de collection sur la structure.
3. Les calculs thermodynamiques et de transfert de chaleur de l'accumulation de glace basés sur la conservation de masse et de chaleur pour déterminer la masse de glace accumulée sur la structure.
4. La détermination de la nouvelle forme de la géométrie due au givrage.

Les calculs de la collection sur un cylindre en utilisant l'équation proposée par (Lozowski, Stallabrass, & Hearty, 1983) peuvent être utilisés comme première approximation d'accrétion de glace sur des différents objets, dans la mesure où l'étude du givrage du cylindre est fondamentale en plusieurs domaines de recherche du givrage (Fortin G. , Cours de la thermodynamique de la glace atmosphérique, 2009).

Le calcul de l'accumulation de glace sur le cylindre s'inscrit dans un plan de travail du Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE) sur le givrage des éoliennes qui se penchera sur les étapes ci-dessous afin d'appliquer la méthode validée au niveau du cylindre aux pales d'éoliennes. Les logiciels utilisés sont des logiciels fondamentalement tridimensionnels et incluent tous les outils et modèles pour passer à une simulation intégrale du phénomène sur un rotor d'éolienne. Cependant, cette application requière des ressources informatiques qui dépassent les capacités actuelles au LREE.

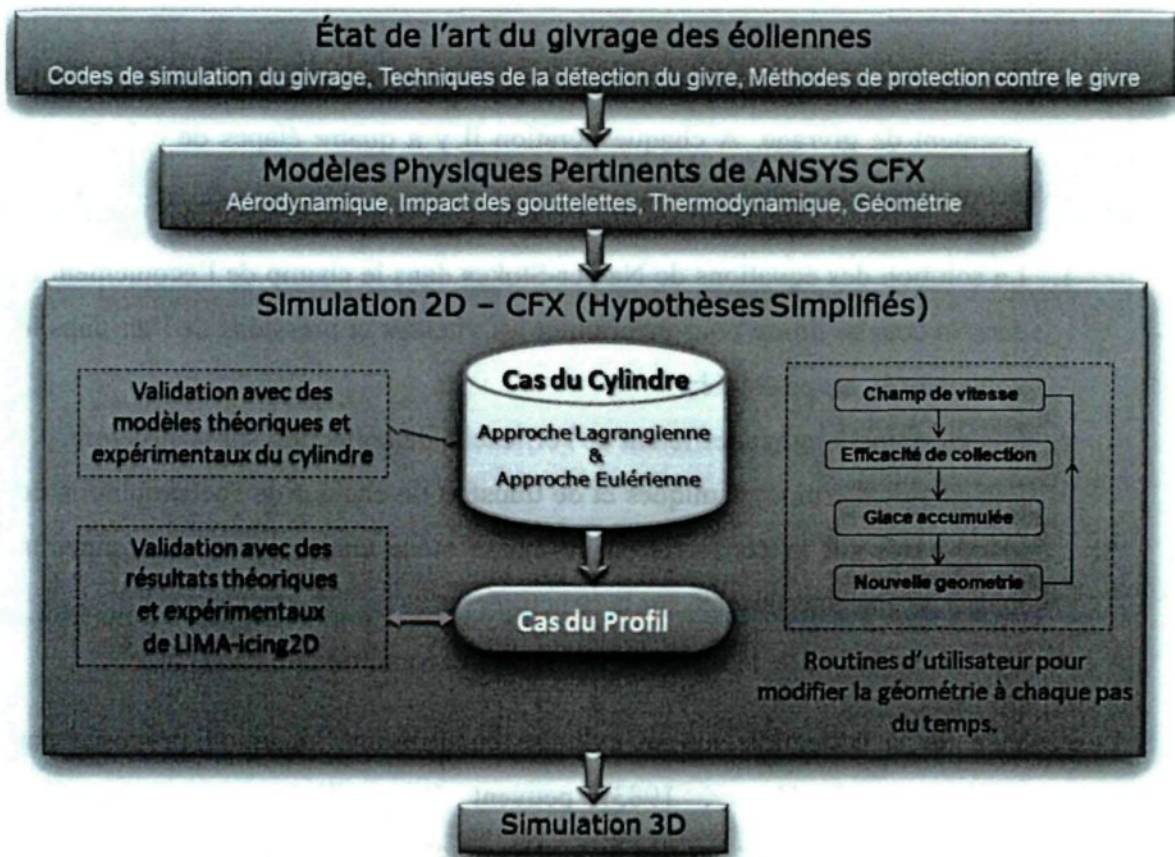


Figure 2. Le plan intégral d'études pour arriver à une simulation tridimensionnelle de l'accrétion de glace

Afin de déterminer le coefficient d'efficacité de collection, il existe deux approches de calcul : calcul des trajectoires des gouttelettes d'eau et détermination des points d'impact avec l'objet (approche Lagrangienne) ou l'estimation de la fraction volumique d'eau dans chaque volume de contrôle (approche Eulérienne) en utilisant des modèles multiphasiques disponibles dans le logiciel ANSYS CFX avec un routine d'utilisateur. Cette étude se concentre sur ces deux approches de calcul pour vérifier l'influence des différents paramètres et pour mieux comprendre le comportement des gouttelettes d'eau en air et le processus de captation.

1.5 L'ÉTAT DE L'ART DU GIVRAGE

Le givrage influence de façon significative la production annuelle d'énergie et il n'existe pas actuellement des moyens fiables de le prédire de façon automatisée. Des modèles numériques sont développés et étudiés pour tenter de prédire la forme de givrage accumulé et d'estimer les conséquences sur les forces aérodynamiques. Les sections suivantes résument l'état de l'art sur le givrage des éoliennes.

1.5.1 LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES AFFECTANT L'ACCRÉTION DE GLACE

Les hydrométéores et les averses comme le brouillard givrant et les pluies verglaçantes sont caractérisés par la teneur en eau liquide LWC (Liquid Water Content) en g/m^3 qui est la quantité d'eau contenue dans un volume d'air donné, et le spectre du diamètre des gouttelettes d'eau en surfusion qui est remplacé, pour la simplification, par la valeur médiane de la distribution MVD (Median Volumetric Diameter) en μm . La captation des gouttelettes d'eau en surfusion ou des flocons de neige dépend de l'interaction entre les paramètres caractérisant le phénomène. L'approche de Messinger (Messinger, 1953) identifie des paramètres affectant la forme de glace qui s'accumule sur les structures, en plus de la teneur en eau liquide LWC et du diamètre volumétrique médian MVD se retrouvent la forme des gouttelettes d'eau ou des flocons de neige, la vitesse de l'écoulement d'air V_a , la température de l'air T_a , l'altitude, le temps d'accrétion Δt et l'épaisseur selon la forme de l'objet (le diamètre du cylindre ou la corde du profil aérodynamique) (Fortin & Perron, Wind Turbine Icing and De-Icing, 2009). La température de l'air, la vitesse de l'air et la teneur en eau liquide ont les effets les plus importants sur la forme de glace qui s'accumule dans des conditions données, avec une prédominance pour la température (Lozowski, Stallabrass, & Hearty, 1983). L'étude du givrage demande l'accès à des nombreuses données météorologiques, comme la température, la vitesse du vent et la teneur en eau liquide, mais aussi la connaissance de données techniques précises

sur les éoliennes du site étudié comme le diamètre du rotor, sa vitesse de rotation ou la géométrie des pales (Hochart C. , 2006).

1.5.2 L'EFFICACITÉ DE LA COLLECTION

La capacité d'un objet à capter les gouttelettes d'eau présentes dans l'écoulement est appelée l'efficacité de la collection. La Figure 3 montre la déviation des gouttelettes d'eau à l'interception avec un objet. L'efficacité de la collection est définie par $E = \frac{Y}{H}$ où H est la hauteur frontale de l'objet et Y est la hauteur de la section transversale du flux d'eau.

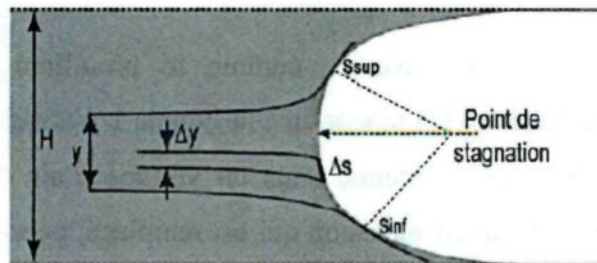


Figure 3. Définition de l'efficacité de collection

L'efficacité de la collection locale, définie par le coefficient de collection β , peut s'écrire sous forme différentielle $\beta = \frac{dy}{ds}$ où s est l'abscisse curviligne de la surface où les gouttelettes interceptent l'objet. L'efficacité de la collection locale est influencée par la vitesse de l'air, le diamètre volumétrique médian de la distribution des gouttelettes d'eau (MVD), la corde ou le diamètre du cylindre et par l'angle de l'incidence de l'écoulement (Fortin & Perron, Wind Turbine Icing and De-Icing, 2009).

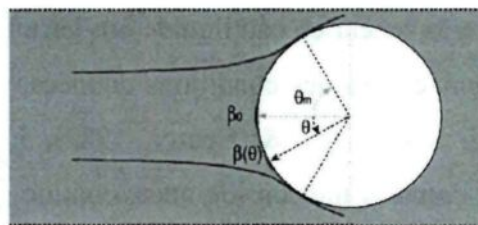


Figure 4. L'efficacité de la collection locale sur un cylindre par rapport à l'angle de l'incidence

1.5.3 LES RÉGIMES DE L'ACCUMULATION DE GLACE

Il existe deux régimes principaux de l'accrétion de glace : le régime sec (le givre) et le régime humide (le verglas); ce qui détermine si le givre ou le verglas vont se former, c'est la capacité du milieu ambiant d'absorber la chaleur latente de solidification. La limite de Ludlam est la teneur en eau liquide critique qui définit la frontière entre l'accumulation en régime sec ou humide.

▪ Le régime sec (le givre)

L'accrétion de glace s'effectue en régime sec lorsque la teneur en eau liquide est inférieure à la limite de Ludlam (L.L.), la température de la surface est inférieure à la température de congélation de l'eau et la fraction solide est égale à 1. Cela signifie que toutes les gouttelettes d'eau en surfusion se solidifient en formant un noyau de congélation pour les autres gouttelettes qui frappent le même endroit. Toutes les gouttelettes d'eau surfondue qui heurtent l'objet gèlent à l'impact pour former une glace laiteuse appelée givre. Le givre est caractérisé par une solidification rapide en raison des petites gouttelettes d'eau en surfusion qui gèlent instantanément. Il est constitué d'une surface rugueuse composée d'une glace de faible densité qui est opaque et laiteuse, car un nombre élevé de bulles d'air est emprisonné à l'intérieur de la structure de glace (Saeed, 2003).

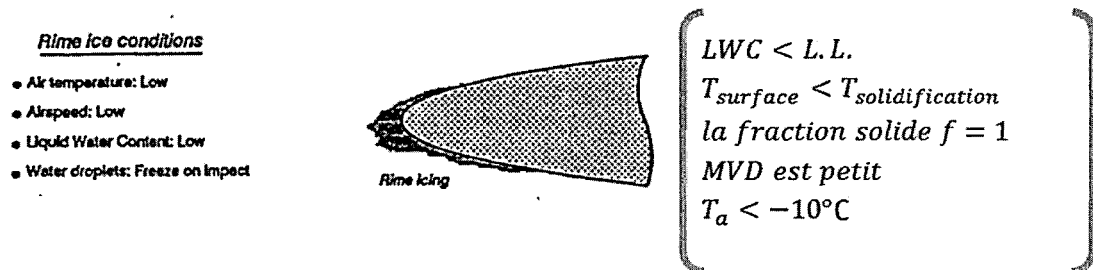


Figure 5. Le régime sec (le givre)

▪ Le régime humide (le verglas)

L'accrétion s'effectue en régime humide lorsque la teneur en eau liquide est supérieure à la limite de Ludlam, la température de surface avoisine la température de solidification de l'eau et la fraction solide est comprise entre 0 et 1. Une partie des gouttelettes d'eau en surfusion se solidifie et une certaine quantité d'eau reste emprisonnée à l'intérieur de la matrice de glace lorsqu'une seconde gouttelette d'eau arrive au même endroit. Cette eau sous forme liquide peut former de la glace spongieuse ou s'écouler sous l'effet des forces aérodynamiques. Une fraction des gouttelettes d'eau surfondue qui heurtent l'objet gèle à l'impact pour former une glace transparente appelée verglas dont la densité est de 917 kg/m^3 . Le verglas (en régime humide) est plus important et il déforme considérablement le profil aérodynamique du à la formation de cornes (Fortin G. , Cours de la thermodynamique de la glace atmosphérique, 2009).

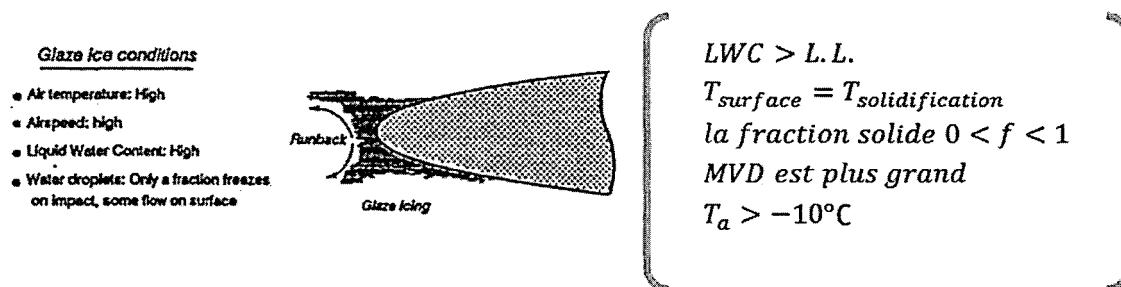


Figure 6. Le régime humide (le verglas)

1.5.4 LES MODÈLES NUMÉRIQUES DE L'ACCRÉTION DE GLACE

Depuis 1980, les modèles numériques ont été progressivement améliorés. Plusieurs groupes de recherche à travers le monde ont développé des modèles pour déterminer

l'accrétion locale en régime sec et humide sur une aile d'avion. FENSAP-ICE 3D développé à l'université McGill (Canada) et décrit par Habashi (Habashi, Morency, & Beaugendre, 2001) peut prédire la formation de glace sur un avion en 3D.

Le logiciel CIRA-LIMA a été réalisé pour simuler l'accrétion de la glace sur un objet bidimensionnel fixe. C'est un modèle développé par LIMA (Laboratoire International des Matériaux Antigivre) en collaboration avec le CIRA (Centre Italien de Recherche Aérospatiale) (Ilinca, Fortin, & Laforte, *Modele d'accretion de glace sur un objet bidimensionnel fixe applicable aux pales d'eoliennes*, 2004). Un code de simulation en deux dimensions pour prédire la forme de l'accrétion de glace sur plusieurs sections de pale d'éolienne a été développé en 2006 dans le cadre des recherches menées par le Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR). Ce code, reposant sur le logiciel CIRA-LIMA, a également été vérifié expérimentalement par le Laboratoire International des Matériaux Antigivre (LIMA) de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) (Hochart C. , 2006). Des essais en soufflerie réfrigérée basés sur les résultats de Hochart ont été réalisés par (Mayer, 2007) sur des pales éoliennes avec un système électrothermique afin d'étudier la rentabilité du système de dégivrage lors de la phase de conception d'un parc éolien en fonction des conditions climatiques propres au site d'installation du parc.

L'étude bibliographique a montré que les codes réalisés et qui permettent de simuler la glace sont limités et orientés principalement vers l'aéronautique. Les modèles numériques pour simuler la condition de givrage sur les avions ne peuvent pas être appliqués directement aux éoliennes en raison de la rotation des pales et des nombres de Reynolds et Mach différents. Les applications les plus proches du cas des éoliennes sont celles des hélicoptères, bien que les objectifs ne sont pas compatibles vu que la recherche du givrage en aéronautique est orientée vers la sécurité, tandis que la recherche sur les éoliennes est orientée vers la rentabilité. L'application de ces modèles sur les pales d'éoliennes nécessite l'étude des écoulements autour des profils aérodynamiques plutôt que des cylindres, néanmoins les fondements physiques et numériques restent les mêmes.

Tous les modèles cités se basent sur l'équation développée par Messinger (Messinger, 1953) et sur les travaux de Lozowski (Lozowski, Stallabrass, & Hearty, 1983). Pour la majorité des modèles de simulation de glace, la phase liquide n'est pas simulée adéquatement, ce qui entraîne des simplifications qui limitent la qualité de prédiction de ces modèles. Cependant, cette phase est toujours présente en régime humide et même en régime sec durant de très brefs instants. Elle domine la forme de l'accrétion de glace. L'absence de simulation de la phase liquide entraîne généralement l'usage d'hypothèses simplificatrices limitant ainsi le pouvoir de prédiction de ces modèles (Fortin G. , 2003). La signification des phénomènes du régime humide consiste généralement à supposer que tout le liquide non gelé, qui est généré sur un élément de surface, est complètement entraîné durant un incrément de temps et s'écoule vers le prochain élément de surface. Il faut aussi noter que, sans simulation détaillée de la phase liquide, la rugosité locale, la densité de la glace, l'eau liquide résiduelle, l'arrachement et l'éclaboussure des gouttelettes d'eau en surfusion sont généralement estimées en utilisant des corrélations empiriques (Fortin G. , Cours de la thermodynamique de la glace atmosphérique, 2009).

Au cours des dix dernières années, les recherches ont apporté une meilleure compréhension de la physique de la phase liquide. Les études de Al-Khalil en 1991 (Al-Khalil, Keith, De Witt, & Nathman, 1989) permettent de décrire analytiquement la formation et le mouvement des gouttes et des ruisselets de surface comme étant le résultat de l'équilibre entre les forces de cisaillement induits par les effets aérodynamiques, de gravité et de tension de surface. Les travaux de (Hansman & Turnock, 1988) ont démontré que la tension de surface est probablement le principal responsable de ce phénomène. (Fortin G. , Cours de la thermodynamique de la glace atmosphérique, 2009)

1.6 SIMULATIONS NUMÉRIQUES DE L'ÉCOULEMENT D'AIR ET L'ACCUMULATION DE GLACE AUTOUR D'UN CYLINDRE

L'écoulement potentiel autour d'un objet bidimensionnel peut être calculé par la méthode des panneaux de Hess-Smith (la surface de l'objet est discrétisée par des panneaux) ou par une méthode d'éléments finis (le domaine de calcul est discrétisé par une grille). La méthode des panneaux est plus facile mais moins efficace pour calculer les points de séparation de la couche limite et les vitesses près de la surface car elle ne tient pas compte des effets du frottement, de la turbulence et de la rugosité de la surface.

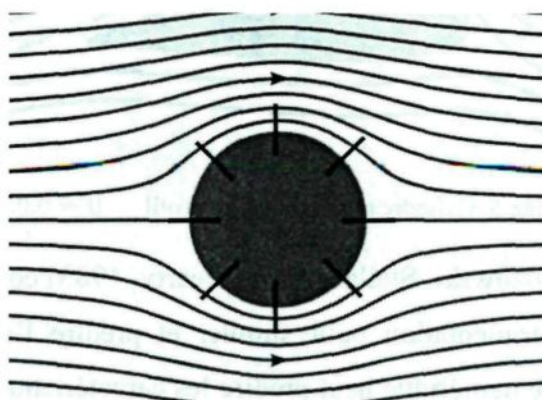


Figure 7. Les lignes de courant de l'écoulement potentiel autour d'un cylindre circulaire discrétisée par des panneaux.

Les modèles 3D les plus avancés comme ceux utilisés dans *FLUENT* utilisent la théorie des éléments finis ou des volumes finis pour résoudre les équations de Navier-Stokes. La résolution des équations de mouvement et de continuité de Navier-Stokes demande des ressources informatiques importantes et un temps de calcul relativement long. Habituellement, la méthode des panneaux est utilisée au début pour faciliter la simulation, puis, des échantillons des études sont évalués avec la méthode de Navier-Stokes pour valider les calculs (Fortin G. , Cours de la thermodynamique de la glace atmosphérique, 2009).

L'étude du givrage du cylindre est fondamentale en plusieurs domaines de recherche du givrage. Selon les études de Lozowski et al. (Lozowski, Stallabrass, & Hearty, 1983),

les calculs de la collection locale pour un cylindre peuvent être utilisés comme première approximation de l'accrétion de glace sur d'autres objets. Pour simplifier les calculs de l'accrétion de glace sur un profil, un cylindre avec un diamètre de 0.03 de la corde du profil peut être représentatif (Fortin G. , Cours de la thermodynamique de la glace atmosphérique, 2009).

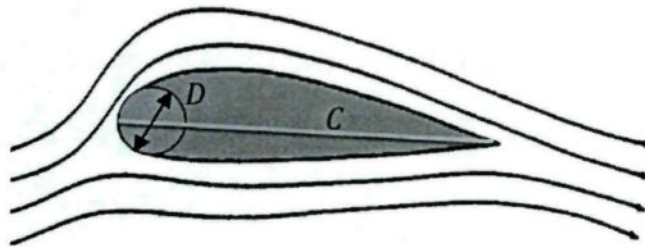


Figure 8. Cylindre représentant un profil $D = 0.03 C$

Les travaux de (Lozowski, Stallabrass, & Hearty, 1983) comprenaient une simulation numérique et une expérimentation pour simuler et prédire l'accrétion de glace sur un cylindre fixe. Le modèle numérique peut prédire les caractéristiques de l'accrétion de glace sur un cylindre fixe, comme la croissance au point de stagnation, la forme de l'accrétion et le volume total des dépôts de glace. Les essais expérimentaux en soufflerie sont utilisés pour étudier les mécanismes de formation de glace et pour valider le modèle numérique. Les deux modèles ont été réalisés pour plusieurs conditions de la vitesse de l'air, de la température, de la teneur en eau liquide LWC et du diamètre volumique médian MVD de la distribution des gouttelettes.

1.6.1 L'APPROCHE EULÉRIENNES AVEC CFX POUR L'ESTIMATION DE L'EFFICACITÉ DE COLLECTION

Le développement accéléré des logicielles commerciaux a permis d'obtenir une grande capacité de simulation des phénomènes complexes dans plusieurs domaines de

recherche comme la combustion dans les moteurs dont le processus chimique est très complexe avec changement de phase. Les codes commerciaux de CFD, comme Fluent et CFX et les codes «open source» comme OpenFoam, offrent la possibilité d'uniformiser la recherche et de la rendre accessible aux chercheurs dans ce domaine. D'un autre côté, les codes commerciaux de CFD prennent de plus en plus de place dans l'industrie et dans les centres de recherche (Villalpando, 2009).

CFX propose un grand nombre des modèles aérodynamiques permettant de modéliser les écoulements d'air turbulents. Certains ont des applications très spécifiques, alors que d'autres peuvent être appliquées à des catégories plus larges d'écoulements avec un degré de précision adéquat. En plus, CFX fournit la possibilité d'introduire des codes définis par l'utilisateur en utilisant les langages informatiques : CEL (CFX Expansion Language) et le FORTRAN avec l'interface *User Junction Box Routines*.

Dans leurs études des phénomènes de l'aéroélasticité, (TARDIF & ILINCA, 2008) ont démontré la capacité des modèles proposés par CFX à simuler en 3D la turbulence de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne. Ces modèles ont également été utilisés par (Villalpando, 2009) avec FLUENT et ils ont montré une bonne capacité à simuler la turbulence et les écoulements complexes autour des pales d'éoliennes.

L'étude de Tardif (Tardif, 2009) a indiqué que parmi les modèles aérodynamiques proposés par ANSYS-CFX, le $k-\omega$ SST est le plus adapté à l'étude de la couche limite des écoulements d'air autour d'un profil de pale d'éolienne. Par contre, la documentation de CFX suggère l'utilisation du modèle de turbulence $k-\epsilon$ pour les modélisations multiphasiques.

Dans le cadre de cette étude, les simulations ont été effectuées pour le cas du cylindre en utilisant les deux modèles de turbulence : $k-\epsilon$ et le $k-\omega$ SST. Les deux modèles ont très bien performé comparativement. Nous avons utilisé le modèle «Eulerian-Eulerian» pour la modélisation multiphasique de la fraction volumique d'eau «*Water Volume Fraction*» qui représente la fraction d'eau dans un volume de control de l'air atmosphérique. Les résultats

de l'efficacité de collection locale ont été validés avec des résultats d'une approche Lagrangienne et avec des résultats expérimentaux. Les détails et l'analyse des résultats sont présentés dans le premier article, au chapitre 2.

1.6.2 CALCUL DES TRAJECTOIRES DES GOUTTELETTES D'EAU AVEC UNE APPROCHE LAGRANGIENNE

La simulation des trajectoires des gouttelettes d'eau se base principalement sur les forces agissant sur les gouttelettes d'eau, sur l'échange thermique et massique entre les gouttelettes d'eau et l'air et sur les caractéristiques de l'écoulement (Fortin G. , Cours de la thermodynamique de la glace atmosphérique, 2009). L'interaction des gouttelettes d'eau entre elles et la perturbation de l'écoulement d'air par les gouttelettes d'eau sont négligées afin de réduire la complexité du problème.

Le modèle mathématique est construit des équations différentielles de mouvements et des calculs de l'écoulement. La méthode de Runge-Kutta dans sa version dite d'ordre 4 est utilisée pour résoudre ces équations. Plusieurs scénarios de calcul sont appliqués et analysés en prenant chaque fois des conditions aux limites et initiales différentes concernant la position des gouttelettes, la vitesse à l'infinie de l'écoulement de l'air et celle des gouttelettes et le pas du temps. Une interface interactive flexible basée sur l'utilisation des feuilles de calcul Excel est utilisée pour démontrer les différents scénarios de calcul de la trajectoire des gouttelettes d'eau dans l'écoulement d'air. Les détails de ce travail et l'analyse des résultats sont décrits dans le deuxième article, au chapitre 3.

CHAPITRE 2

UNE APPROCHE CFX MULTIPHASE POUR LA MODELISATION DE L'ACCRETION DE GLACE SUR UN CYLINDRE

2.1 RÉSUMÉ DU PREMIER ARTICLE

La conception des éoliennes doit tenir compte de leur résistance aux conditions extrêmes comme l'accumulation de glace. Le givrage est un problème complexe où plusieurs études doivent être menées pour proposer un modèle précis de simulation de ce phénomène sur les pales d'éoliennes afin de prédire les pertes de puissance dues à la déformation du profil aérodynamique des pales.

Le développement d'un code pour la solution numérique des équations de Navier-Stokes est compliqué et c'est pourquoi nous avons utilisé des logiciels commerciaux avec des modèles mathématiques prêts à utiliser pour les calculs des écoulements. Les modèles tridimensionnels les plus avancés comme ceux utilisés dans Fluent ou CFX utilisent la théorie des éléments finis ou des volumes finis pour résoudre les équations de Navier-Stokes. Ce projet présente le modèle numérique de l'écoulement et les calculs de l'efficacité de collection locale de l'accrétion de glace autour d'un cylindre fixe en utilisant les modèles numériques d'ANSYS-CFX.

Cette étude s'inscrit dans une étude plus large menée au Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE) sur le givrage des éoliennes. Nous avons donc appliqué une approche Eulérienne, basée sur les outils de modélisation multiphasique (eau dans l'air) d'ANSYS-CFX pour simuler l'accrétion de glace sur un cylindre. Ces simulations ont été validées avec des résultats numériques et expérimentaux pour pouvoir passer à une étape ultérieure. L'étude fondamentale de l'accrétion de glace sur un cylindre est la première

étape à faire pour plusieurs domaines de recherche sur le givrage en raison de la relative simplicité géométrique du cylindre et de la disponibilité de résultats pour les validations.

Ce premier article, intitulé «*A multiphase CFX based approach into ice accretion modeling on a cylinder*», fut élaboré par moi-même ainsi que par le professeur Adrian Ilinca, mon collègue, Drishty Ramdennee et Hussein Ibrahim, directeur de recherche au TechnoCentre Éolien et professeur associé à l'UQAR. Il fut accepté pour publication dans sa version finale en 2011 dans la librairie numérique «*IEEE eXplore*» de IEEE. En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail fut l'essentiel des recherches bibliographiques, le développement de la méthode, la modélisation, la simulation, et la rédaction de l'article. Le professeur Adrian Ilinca a fourni l'idée originale. Il a contribué au développement de la méthode ainsi qu'à la révision de l'article. Drishty Ramdennee a contribué aux simulations numériques ainsi qu'à la rédaction de l'article. Hussein Ibrahim a contribué à l'état de l'art du givrage ainsi qu'à la révision de l'article. Cet article a été présentée à la conférence «*2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference*» qui a eu lieu à Winnipeg, Manitoba, (Canada) du 3 au 5 octobre 2011.

A multiphase CFX based approach into ice accretion modeling on a cylinder

Fahed Martini, Drishty Ramdenee, Hussein Ibrahim, Adrian Ilinca

Abstract

As conventional fuel price has been on a roller coaster ride to a zenith for the past decade, renewable energies, mostly wind energy, have known a constant growth. Wind energy has escalated from an annual production of about 5000 MW in 1995 to approximately 90 000 MW production in 2005 [5]. This trend has been fuelled by improvement in the design of turbines and their resistance to extreme conditions like ice accretion. This phenomenon triggers the degradation of turbine performance and increases vibration problems. In an aim to mitigate this problem, it is important to predict the shape, type and extent of ice accretion in order to apply optimised de-icing strategies. However, ice accretion is a very complex and several upstream studies need to be conducted to propose a precise model to simulate this phenomenon. This article proposes one such upstream study inscribed in a more global study being conducted at the Wind Energy Research Laboratory on ice accretion – CFX based modelling of water droplets flow in an airstream until impingement on a cylinder. This model makes part and parcel of a more elaborate project whereby thermodynamics and phase change equations will be applied on each water droplet to simulate the new geometry due to ice accretion. The water droplets /airstream flow is then iteratively simulated on the modified geometry to model the transient ice accretion phenomenon. This article emphasis on the intrinsic parameters in multiphase modelling, the factors affecting local and global water droplets collection, models simplifications, the analytical equations used in the model, the obtained results and the options for further improvement of the model.

Index Terms: Wind energy, Icing, Ice accretion, CFX

I. NOMENCLATURE

A Area of an element, m^2

T Temperature $^{\circ}K$

e Energy per unit mass, J/kg

h Plank's constant

Q Quantity of heat, J/kg

\vartheta Elementary Volume, m^3

F. Martini, D. Ramdenee, A. Ilinca, Université du Québec à Rimouski,
G5L 3A1, Canada, (e-mail: {fahed.martini@uqar.ca}, {dreutch@hotmail.com},{adrian_ilinca@uqar.ca}).
H. Ibrahim, TechnoCentre éolien, 51 ch. de la mine, Murdochville, QC,
G0E 1W0, Canada, (e-mail: hibrahim@eolien.qc.ca).

II. INTRODUCTION

A part from increasing the swept area via a trend to gigantism, power production can be peaked in regions of higher air density and higher average wind regimes. Such conditions are usually available in Nordic regions. Paradoxically, wind turbines are subjected to ice accretion in these regions. Ice accretion is dire to the structure and triggers vibration and a resulting decline in power output. In order to mitigate these baneful effects, de-icing and ice mitigation procedures are used. However, these techniques are energy-costly. For optimised results while moderating energy use to apply de-icing techniques, it is important to be able to predict the shape, size, type and position of ice accretion on wind blades. In order to achieve this prediction, complex tools that can 1) model the air-water stream flow, 2) define impingement regions, 3) calculate water droplet collection efficiency on the blade or airfoil, 4) apply thermodynamics equations on the water droplets to simulate phase change and resulting icing or surface runoff and 5) estimate blade or airfoil geometry deformation. Iterative mesh change with geometry change and continuous ice accretion modelling should be performed. The creation of such a tool is very complex and requires completion of numerous sub steps. At the WERL, numerous studies are being conducted on ice accretion modelling and one of the preliminary steps is to implement a module capable of modelling water droplets in an airstream according to different velocities, liquid water concentration, etc and simulate the impingement zone and accumulation on a downstream body. This model will be used further as a module for flow and water accumulation to model ice accretion.

III. ICE ACCRETION THEORY

Ice accumulation on a solid surface occurs when climatic conditions are conducive: high humidity levels and low temperature. At temperatures 0°C down to -40°C , fog-type humidity is composed of super-cooled water droplets. This means that the temperature of the liquid phase water droplets is lower than freezing point. Upon collision with an object, the water droplets release their latent heat of solidification. This causes immediate solidification of the water droplets on the surface of the object. If the air near the solid surface is capable of absorbing all the energy released by the water droplets during solidification, the latter will, either, solidify immediately or a part will stay in the liquid phase or will runoff the surface. The super-cooled water droplets, that have a slightly inferior temperature than that of ambient air, strike the surface of the ice that covers an object. The water droplets solidify after impact due to super-cooling and the ice dendrites grows rapidly with respect to the level of super-cooling. The super-cooling level, also, influences the shape of the formed ice. The solidification takes place at a latent heat of solidification absorption capacity by ambient air or the object dependent rate. Therefore, depending on absorption rate capacity (temperature, humidity level, etc), we can be subjected to different types of icing phenomena. There are three types of atmospheric icing related to wind turbine: in-cloud, precipitation or frost [1], [2], [3], [4]. In-cloud icing happens when super-cooled water droplets hit a surface below 0°C and freeze upon impact. The droplets temperature can be as low as -40°C and they do not freeze in the air unless they interact with a solid surface. Accretions have different sizes, shapes and properties, depending on the number of droplets in the air (liquid water content - LWC) and their size (median volume diameter - MVD), the temperature, the wind speed, the duration, the chord length of the blade and the collection efficiency. There is a continuum of ice accretion appearance from rime at coldest temperatures to glaze at warmest. Soft rime: thin ice with needles and flakes appears when temperature is well below 0°C , the MVD is small and when LWC smaller than critical value. The resulting accretion will have low density and little adhesion. Hard rime: higher MVD and LWC will cause accretion with higher density, which is more difficult to remove. Glaze: when a portion of the droplet does not freeze upon impact, but run back on the surface or freezes later. The resulting ice density and adhesion are strong. It is often associated with precipitation. Precipitation: can be snow or rain. The accretion rate can be much higher than in-cloud, which causes more damage. Freezing rain: when rain falls on a surface whose temperature is below 0°C . It often occurs during inversion. Ice density and adhesion are high when this phenomenon occurs. Wet snow: when snow is slightly liquid at air temperature between 0 and -3°C , it sticks to the surface. It is easy to remove at first, but can be difficult if it freezes on the surface. Frost: appears when water vapour solidifies directly on a cool surface. It often occurs during low winds. Frost adhesion may be strong.

IV. JUSTIFICATION OF THE WORK AND MODEL CHARACTERISTICS

This work inscribes itself as a module within the integral project of ice accretion which consists in 1) modelling airstream flow, 2) intrinsic flow and trajectory of super-cooled water droplets within the airstream, 3) defining impingement zone of the water droplets on the airfoil, 4) applying thermodynamics equations on the water droplets to calculate amount of ice formation or subsequent surface runoff, 5) modelling the resulting geometry due to ice accretion and 6) iteratively model the subsequent ice accretion over time. This work will set the milestone in 1) determining the capacity of using CFX as a finite volume computational fluid dynamics tool to model ice accretion, 2) calibrate the model on a cylinder geometry by comparing obtained data with existing experimental data, 3) evaluate the weaknesses and limitations of the model and propose possible add-ons for improvement. The advantage of modelling ice accretion is to be able to simulate the size, type and region of ice accretion. This will enable to optimise the type, size and region of application of ice accretion mitigation systems. [6], [7]. This simulation tool will be a pertinent support to reduce the very dangerous and baneful phenomenon of ice accretion. Ice accretion is a particular nuisance at ventilation inlets and other openings and at anemometer. In most cases, the anemometer system on the nacelle roof is the first one to be taken out of action unless icing is prevented by heating. This type of icing can critically affect the operability of the system, especially if the system has been dormant for some time to be started again. Ice accretion, furthermore, worsen the aerodynamic airfoil characteristics. This results to a deteriorating power curve, which, in turn, considerably reduces energy output. According to [9], 30 % of the annual energy delivery can thus be lost at sites with a particularly high risk of icing. Furthermore, additional, unbalanced loads on the blades can cause vibration and amplified, frequent aeroelastic effects that can damage or cause turbine failure. Moreover, another potential danger of ice accretion lies in the fact that lumps of ice of considerable mass can be projected away by the rotating rotor over distances of hundred meters. In the first place we need to understand the requirements of the model. The latter should be flexible and be easily integrated in a more elaborate model that uses this present tool results in an automatic and iterative manner to apply thermodynamics equations on impinged ice droplets and continuously evaluate airfoil geometry change. Furthermore, ice accretion depends on several parameters, such that the tool must be generic enabling easy modification of these parameters. Finally, in an aim to improve the accuracy of the model, the latter should be developed in a way to enable implementation of turbulence modelling, multiphase modelling, trajectory modelling (with room for particle-particle interaction and particle-flow interaction in further studies), thermodynamics modelling and an ability to extend to 3D simulation. In previous studies at the WERL, Clement Hochart and G. Fortin modelled ice accretion on a tailor made software [8]. The aim, here, is to repeat this work by using a more high level software which integrates more aerodynamics intrinsic characteristics and which is generic. This flexible and modulable aspect is very important. Many high level finite element and finite volume method based software enable us to model different physical phenomena and connect them in some way or the other to couple different simulations into a multi-physics simulation. For example, say we wish to model the stresses in a heated then pressurized vessel in Solidworks finite element based analysis module, we can first of all, apply the thermal solicitations on the vessel as heat fluxes or temperature fields and then solve for the thermal stresses. The result file is then used as input in a pressure simulation model to model the final stresses which includes both the heat and pressure resulting solicitations. However, ice accretion requires much more complex simulation. The main problem with major commercial software allowing multi-physics modelling is that the CFD flow module is not very accurate and well established. Despite excellent multi-physics tools for coupling, we cannot expect high accuracy results as to what concerns ice accretion as the aerodynamics modelling in common commercial software is not very accurate. ANSYS integrated CFD flow module CFX, is, however, very accurate and offers high level modelling abilities. Other software like "OpenFoam", also, propose high level aerodynamics model in its CFD libraries. The advantage of ANSYS-CFX is its workbench tool that couples the advantage of a very accurate CFD model with a friendly user interface for multi-physics modelling.

V. STRUCTURE OF THE ARTICLE

In this article, we ponder over two aspects of ice accretion modeling in an aim to integrate these modular simulations in the integral project. This paper emphasizes on the aerodynamic aspects of the flow modeling, taking particular attention to domain calibration, turbulence modeling and heat models definition. Then the paper focuses on the modeling of the efficiency of water droplets capture on the cylinder.

VI. COMPUTATION DOMAIN

This work is based on studies conducted at the Wind Energy Research Laboratory (WERL) by T. d'Hamonville and D. Ramdenec [10]. The calculation domain, calibrated for an S 809 airfoil, is defined by a semi-disc of radius $l_1 \cdot c$ around the profile and two rectangles in the wake of length $l_2 \cdot c$. This was inspired from works conducted by Bhaskaran presented in the Fluent tutorial. As the objective of this study is to see the distance between the boundary limits and the profile influence the results, we will thus, only vary l_1 and l_2 and keep other values constant. As these two parameters will vary, the number of elements will also vary. In order to define the optimum calculation domain, we created different domains linked to a preliminary arbitrary one by a homothetic transformation with respect to the centre G and a factor b. Figure1 gives us an idea of the different used parameters and the outline of the computational domain whereas table 1 presents a comparison of the different meshed domains.

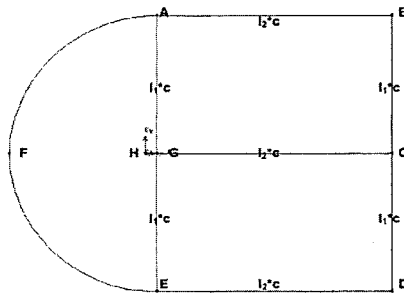


Fig. 1. Field of calculation domain

TABLE I
DESCRIPTION OF THE TRIALS THROUGH HOMOTHETIC TRANSFORMATION

| Trial | Trial 1 | Trial 2 | Trial 3 | Trial 4 | Trial 5 | Trial 6 |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| b | 1 | 0.75 | 0.5 | 0.25 | 2 | 4 |
| l_1 | 12.5 | 9 | 6.25 | 3.125 | 25 | 50 |
| l_2 | 20 | 15 | 10 | 5 | 40 | 80 |
| Number of elements | 112680 | 106510 | 97842 | 84598 | 128142 | 143422 |

Figures 2 and 3 respectively illustrate the drag and lift coefficients as a function of the homothetic factor b for different angles of attack. We notice that the drag coefficient diminishes as the homothetic factor increases but tends to stabilize. This stabilization is faster for low angles of attack (AoA) and seems to be delayed for larger homothetic factors and increasing AoA. The trend for the lift coefficients as a function of the homothetic factor is quite similar for the different angles of attack except for an angle of 8.2° . The evolution of the coefficients towards stabilization illustrate an important physical phenomenon: the further are the boundary limits from the profile, this allows more space for the turbulence in the wake to damp before reaching the boundary conditions imposed on the boundaries. Finally, a domain having as radius of semi disc 5.7125 m, length of rectangle 9.597 m and width 4.799 m was used.

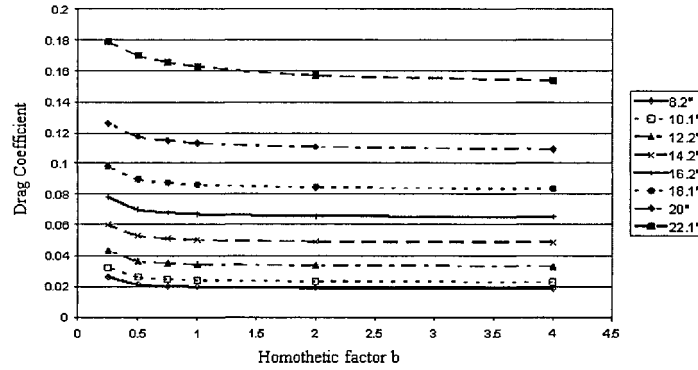


Figure 2: Drag coefficient vs. homothetic factor for different angles of attack

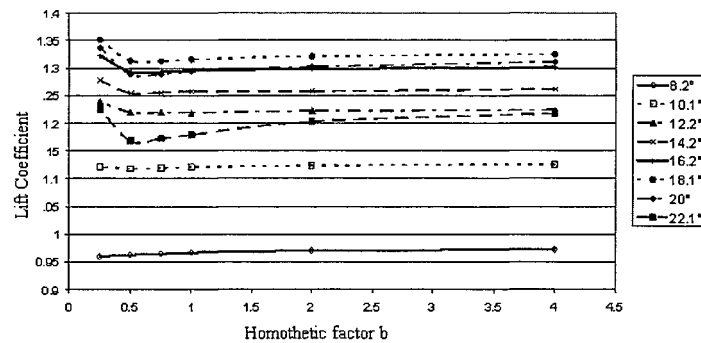


Figure 3: lift Coefficient vs. homothetic factor for different angles of attack

VII. MESHING

Unstructured meshes were used and were realized using the CFX-Mesh. These meshes are defined by the different values defined in table 2. We have kept the previously mentioned domain.

TABLE2
MESH DEFINING PARAMETERS

| Description | Symbol | Value |
|--|--------|----------|
| Size of the elements along the profile (between I and G) | a_1 | 0.001m |
| Size of the first element in the boundary layer | a_3 | 0.00001m |
| Size of the elements on the boundary limits | a_7 | 0.2m |
| Number of layers in the boundary layer | n_3 | 17 |
| Inflation factor in the boundary layer | f_1 | 1.19 |
| Inflation factors near the boundary limits | f_2 | 1.19 |

Several trials were performed with different values of the different parameters describing the mesh in order at the best possible mesh. The different trials consisted in extracting the lift and drag coefficient distribution according to different AOA for a given Reynolds number and the results were compared with experimental results. The mesh option that provided results which fitted the most with the experimental results was used. The final parameters of the mesh as entered in CFX are: the preference is set to CFD. The number of used nodes was 14714 among which none were tetrahedron or pyramid. 5672 were prisms and 4352 hexahedra were used for a total of 10024 elements.

VIII. TURBULENCE MODELING

In this study, we are modeling ice accretion on a cylinder. In this case we do not need to cater for such phenomena as angles of attack and large separations due to large pressure differences when the angle of attack becomes very important. For the cylinder case, simulations were run using the various turbulence models proposed within ANSYS – CFX. It was noticed that both the k-epsilon and the k-omega SST performed comparatively very well. The reason is that limited vortices and resulting separation appear for a cylinder. The model is, however, designed, and intended to be used for airfoils and in a later phase, for 3D profiles. Therefore, the turbulence model calibration was done at the WERL as detailed in [10] for a S 809 airfoil. CFX proposes several turbulence models for resolution of flow over airfoil applications. Documentations from [11] advise the use of three models for such kind of applications namely the k- ω model, the k- ω BSL model and the k- ω SST model. The Wilcox k- ω model is reputed to be more accurate than k- ϵ model in the near wall layers. It has been successfully used for flows with moderate adverse pressure gradients, but does not succeed well for separated flows. The k- ω BSL model (Baseline) combines the advantages of the Wilcox k- ω model and the k- ϵ model but does not correctly predict the separation flow for smooth surfaces. The k- ω SST model accounts for the transport of the turbulent shear stress and overcome the problems of k- ω BSL model. To evaluate the best turbulence model for our simulations, steady flow analysis at Reynolds number of 1 million is conducted on the S809 profile using the defined domain and mesh. Comparison of the lift and drag coefficients with different AoA and for different turbulence models.

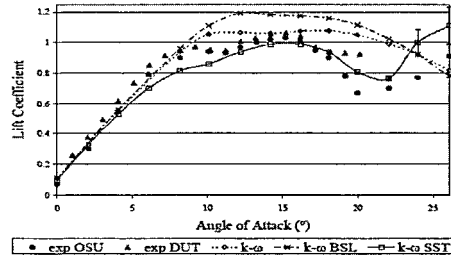


Figure 3: Lift Coefficient vs. Angle of Attack for Re of 1 million

First, we note that the k- ω SST model needs transient computation to converge after 20° when the other models do not. Figure 3 shows that the k- ω and the k- ω BSL model over predict the lift coefficient for angles of attack higher than 10°, especially after 18°. In the same way the Figure 8 shows that these models largely under predict the drag coefficient after 18°. The k- ω SST model predicts results closer to the experimental data than the other models, but for the lift coefficient it has some problems of prediction between 6° and 10°. This problem is due to an over prediction of the separated flows and the transport of turbulences. But the k- ω SST model is the only one to have a relatively good prediction of the large separated flows for large angles of attack. So the transport of the turbulent shear stress really improves the simulation results.

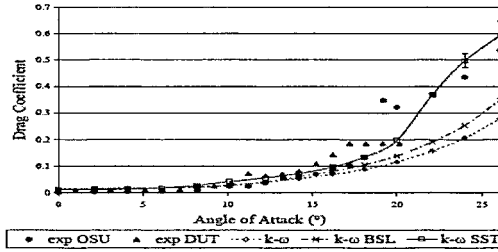


Figure 4: Drag Coefficient vs. Angle of Attack for Re of 1 million

The consideration of the transport of the turbulent shear stress is the main asset of the k- ω SST model. However, probably a laminar-turbulent transition added to the model will help it to better predict the lift coefficient between 6° and 10°, and to have a better prediction of the pressure coefficient along the airfoil for

20°. Therefore, in order to account for potential separations and vortex shedding over the profile for later cases with an airfoil, a $k - \Omega$ SST turbulence model was made use of.

IX. SIMULATION

We first define the inlet, walls and outlet boundary conditions for this simulation. These include the data that revert back to the flow conditions.

TABLE 3
DEFINITION OF BOUNDARY CONDITIONS

| Inlet Boundary Conditions | Value |
|----------------------------|--------------------------------------|
| Flow regime | Subsonic |
| Heat transfer | Total Energy model |
| Static temperature | 275 K |
| Mass and Moment | Cartesian components of the velocity |
| U | 8.0000e+01 [m s ⁻¹] |
| V | 0.0000e+00 [m s ⁻¹] |
| W | 0.0000e+00 [m s ⁻¹] |
| Turbulence | K- Omega SST |
| Fluid, α | air |
| Volume fraction | 0.99 |
| Fluid | water |
| Volume fraction | 5.5000e-07 |
| Outlet boundary conditions | Value |
| Flow regime | Subsonic |
| Mass and Moment | Average static Pressure |
| Relative Pressure | 0.0000e+00 [Pa] |
| Wall Boundary Conditions | Walls |
| Heat Transfer | Adiabatic |
| Mass and Moment | Rough surface |
| Surface roughness | Smooth |

X. VOLUME FRACTION

The volume fraction of the phase at its state of dispersed maximum packing. It is most commonly used for compact solid dispersed phases, for example, as in fluidized beds. The dispersed maximum packing parameter is unity by default for a dispersed fluid. For a dispersed solid phase, it may range from 0.5 to 0.74, the latter being the maximum possible packing for solid spheres. For most applications, the default value 0.62 suffices. For our simulations, we have made use of this default value. The dispersed maximum packing parameter is used in correlations for certain drag laws, and models for particle collision forces. Unfortunately, it is not possible to numerically guarantee that volume fractions are bounded above by the dispersed maximum packing parameter. Consequently, we may observe volume fractions higher than the dispersed maximum packing.

XI. SIMULATIONS

A stationary flow requires a timescale prior to the flow reaching permanent regime. All the simulations in CFX are obtained by a transitory evolution of the flow as from initial conditions proposed by the user. For this simulation, special consideration was given to the physical timescale. In order to reach a stationary case in our case, the water droplets which enter the calculation domain need a time period of (L/V) to reach the cylinder. For our calculation domain, $L = 2$ m and the inlet velocity 80 m/ s. Hence we use a timescale of about 20% of the ratio (L/V) which is equivalent to 0.015 sec. For each simulation, around 300 iterations were needed before reaching a targeted residue of 1×10^{-6} . Figure 5 illustrates the airstream and water droplets velocity distribution y for this simulation. As we can expect the two velocity distributions follow comparable

trends. We notice that the presence of the cylinder retards the velocities in the immediate front of the geometry. Moreover, we notice acceleration of the flow at low angles divergence of the cylinder. This is because, in these regions the streamlines tend to come close to each other such that using law of mass conservation, as the area decreases, the velocity increases. In the wake or rear of the cylinder, we notice regions of low velocities.

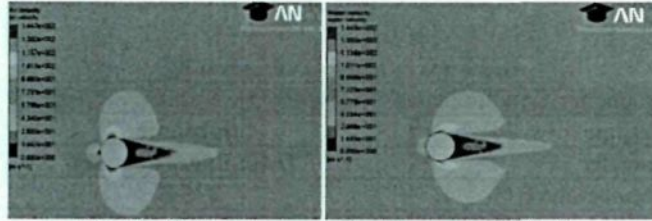


Figure 5: Airstream and water droplets velocity distribution

We notice that in both cases, in the low speed region in the wake, there is a noticeable middle embedded zone of less retarded flow within the very low flow speed. This must be generated due to vortices related accelerations. We, moreover, notice that the water velocity acceleration WERL article WREC- Wind Energy Research Laboratory and deceleration regions illustrate the higher inertia of the water droplets. In general the model correctly depicts the flow regime, justifying proper acceleration and deceleration zones and catering for relative density and, thus, inertia of water particles. On the other hand, figure 6 illustrates water and airstream velocity vectors.

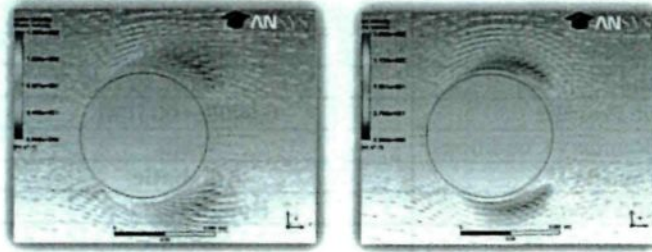


Figure 6: Water droplets and airstream velocity vectors for simulated high unperturbed velocity with controlled physical timescale.

The airstream velocity vectors near the stagnation point diverge from the wall, whereas, the water velocity vectors flow through the wall. These vectors represent the required velocity impacts for ice accretion calculation. The term defined as superficial water velocity relates to the velocity at which the flow would have travelled if the porosity of the domain was 100 %. This is inferior to the real speed. In order to determine the efficiency of ice accretion, it will be more comprehensive to use the term: superficial water velocity instead of water velocity. This is defined as the product of the volumetric water fraction and the velocity vector of water.

$$\vec{V}_{sw} = WVF \cdot \vec{V}_w$$

Figures 7, 8 and 9, below respectively illustrate the water superficial velocity, the water volume fraction distribution and the normalized water volume fraction around the cylinder for this simulation.

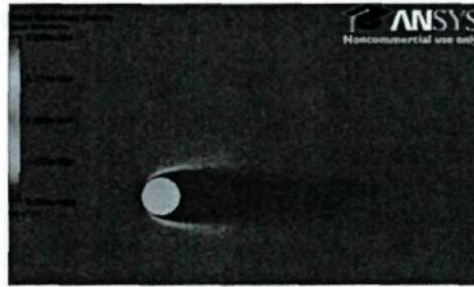


Figure 7: Water superficial velocity distribution around the cylinder

Ice accretion is more acute in the leading edge or frontal face of geometries subjected to super-cooled water droplets flow. Furthermore, velocity distribution showed acceleration regions at low angles subtended by the frontal horizontal axis.

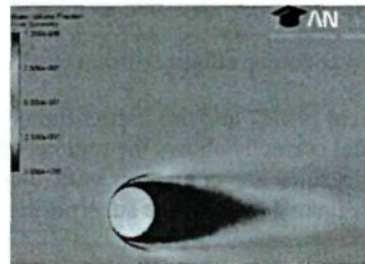


Figure 8: Illustration of the distribution of the water volume fraction

We notice that the model correctly distributes the water volume fraction. The volume fraction is more important in the frontal part and in its peripheries. This corresponds to and gives an idea about the zones where the ice accumulation will be more important. Due to the more important inertia of the water droplets, the water fraction is very small in the wake. This relates to very little or insignificant ice accretion at the back or the wake of the cylinder. The normalized water volume fraction is taken with respect to the value of the water volume fraction at infinity. In figure 9, the water volume fraction is nearly zero in the shaded area. Water droplets start to appear as from the separation zones where the water droplets diverges from the cylinder.

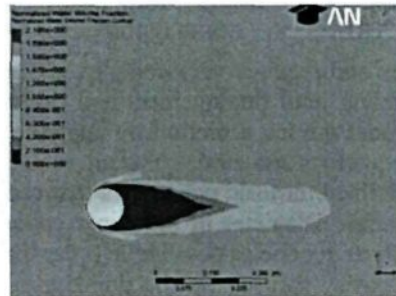


Figure 9: Illustration of the distribution of the normalized water volume fraction.

XII. CALCULATION OF LOCAL COLLECTION EFFICIENCY

The local collection efficiency for a cylinder has been estimated using a Eulerian approach in CFX. The results are shown in figure 10. We illustrate the local collection efficiency on a cylinder with respect to the circumferential distance on the cylinder.

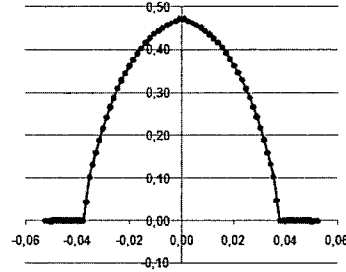


Figure 10: CFX Eulerian based Local collection efficiency distribution along circumference of cylinder

We note that the maximum local coefficient is 0.47 and the impact limits are bounded by -0.04 m and 0.04 m. Though we see that qualitatively the model correctly shows the regions of harsh ice accumulation, we need to validate the results quantitatively. The results are compared with data produced by Ruff et al. using a Lagrangean and Eulerian approach [12]. Figure 11 shows the superposition of the two results.

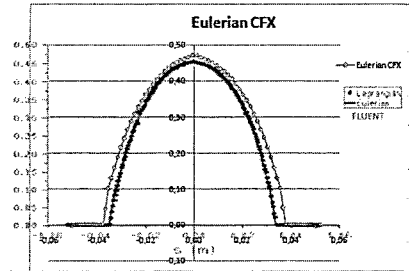


Figure 11: Superposition of results from our CFX based and fluent based model by Ruff et al.

XIII. CONCLUSION

Ice accretion modeling is very complex and requires very complex and multi-disciplinary modeling. In this study we emphasize on the flow modeling until impingement and extraction of local collection efficiency results. These will be later used to model the ice accretion by applying thermodynamic equations. In this study we emphasized on the different equations and models that are required to model the particle tracking in an airstream model. Furthermore, we defined intrinsic parameters that can affect the impingement efficiency and location such as the Mean Volumetric Diameter of the super cooled water droplets, the liquid water content and others. The model was made as generic as possible in order that parameters can be easily changed when required. In this study we, moreover, focused on the domain, mesh, turbulence and energy model calibration. A very important part of this paper tackles the limitations of our model and explains deviations from results as such. In later studies, such limitations will be catered for. We notice that the model provides very interesting results.

XIV. REFERENCES

- [1] Boluk, Y., 1996. "Adhesion of Freezing Precipitates to Aircraft Surfaces", Transport Canada, pp. 44.
- [2] Fikke, S. et al., 2006. COST-727, Atmospheric Icing on Structures: Measurements and data collection on icing, State of the Art. MeteoSwiss, 75: 110.
- [3] ISO-12494, 2001. Atmospheric Icing of Structures. ISO copyright office, Geneva, Switzerland, pp. 56.
- [4] Richert, F., 1996. Is Rotorcraft Icing Knowledge Transferable to Wind Turbines?, BOREAS III. FMI, Saariselkä, Finland, pp. 366-380.
- [5] CANWEA, 2005, Conference report.
- [6] Mayer, C., 2007. Système Électrothermique de Dégivrage pour une Pale d'Éolienne. Master Thesis, UQAR, Rimouski, Canada, 193 pp
- [7] Parent, O., Ilinca, A., Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review, Cold Reg. Sci. Technol. (2010), doi:10.1016/j.coldregions.2010.01.005
- [8] Hochart, C., Fortin, G., Perron, J. and Ilinca, A., 2008. Wind Turbine Performance under Icing Conditions. Wind Energy(11): 319-333
- [9] Sathyajith Mathew, "Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics", Springer Edition, 2006
- [10] D.Ramdene et al. "Numerical Simulation of the Dynamic Stall Phenomenon of an S 809 airfoil" Computational Fluid Dynamics Society, West Ontario University, London (ON). 2010
- [11] ANSYS CFX Help and documentation.
- [12] Ruff, G. A.; Berkowitz, B. M., 1990, Users Manual for the NASA Lewis Ice Accretion Prediction Code (LEWICE), NASA CR185129

CHAPITRE 3

UNE INTERFACE INTERACTIVE LAGRANGIENNE POUR MODELISER L'ACCRETION DE GLACE SUR UN CYLINDRE - CAS DE TEST POUR LA MODELISATION DU GIVRAGE SUR DES PROFILS D'EOLIENNES

3.1 RÉSUMÉ DU DEUXIÈME ARTICLE

L'accumulation de glace apporte des grands risques lors du fonctionnement des éoliennes. Cela coïncide souvent avec des jours particulièrement venteux de l'année. Au LREE-UQAR (Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne), en collaboration avec le TechnoCentre Éolien et LIMA (Laboratoire International des Matériaux Antigivre), de nombreuses études ont été réalisées pour comprendre, modéliser et réduire les effets de l'accumulation de glace sur les pales d'éoliennes. Dans cet article nous avons utilisé ces études afin de simuler un cas de test de givrage autour d'un cylindre comme décrit dans (Lozowski, Stallabrass, & Hearty, 1983). Du fait de nombreuses simplifications, ces études ne peuvent pas fournir des résultats locaux très précis. Pour bien comprendre le comportement des gouttelettes d'eau dans l'air lorsqu'elles rencontrent un objet, nous avons donc développé au LREE une interface interactive pour simuler les trajectoires des gouttelettes d'eau dans un écoulement d'air lorsqu'elles sont interceptées par un cylindre. Cette interface est basée sur feuilles de calcul Excel pris en charge avec un code VBA (Visual Basic pour Applications) en utilisant un schéma de résolution numérique Runge-Kutta d'ordre quatre (RK4). Cette interface offre une flexibilité et une simplicité d'utilisation pour démontrer les différents scénarios pouvant aider à calculer la déflexion des gouttelettes d'eau dans l'écoulement d'air et à déterminer le coefficient local de collection par une méthode Lagrangienne ainsi qu'à valider des simulations ultérieures de l'efficacité de collection basées sur une simulation multiphasique de CFX.

Ce deuxième article, intitulé « *A Lagrangean Interactive Interface to Evaluate Ice Accretion Modeling on a Cylinder – A test case for icing modeling on wind turbine airfoils* », fut élaboré par moi-même ainsi que par le professeur Adrian Ilinca, mon collègue, Drishty Ramdennee et Hussein Ibrahim, directeur de recherche au TechnoCentre Éolien. Il fut accepté pour publication dans sa version finale en 2011 dans la librairie numérique «IEEE eXplore» de LEEE. En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail fut l'essentiel des recherches bibliographiques, le développement de la méthode, la modélisation, la simulation, et la rédaction de l'article. Le professeur Adrian Ilinca a fourni l'idée originale. Il a aidé au développement de la méthode ainsi qu'à la révision de l'article. Drishty Ramdennee a contribué aux simulations numériques ainsi qu'à la rédaction de l'article. Hussein Ibrahim a contribué à l'état de l'art du givrage ainsi qu'à la révision de l'article. Cet article a été présenté à la conférence « *2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference* » qui a eu lieu à Winnipeg, Manitoba, (Canada) du 3 au 5 octobre 2011.

A Lagrangean Interactive Interface to Evaluate Ice Accretion Modeling on a Cylinder – A test case for icing modeling on wind turbine airfoils

Fahed Martini, Drishty Ramdenee, Hussein Ibrahim, Adrian Ilinca

Abstract

In the context of global campaign to mitigate climate change effects, researches on wind turbines industry have known a constant growth during the last few years. Wind velocity is so important for wind turbine productivity and very significant wind resources are available in cold regions where icing effects are also significant. Ice accretion increases the risks of unbalanced mass resulting in losses of annual power production, in vibration problems and in security risks. This coincides with the most abundant days of wind in the year. At the WERL (Wind Energy Research Laboratory), in collaboration with the TechnoCentre Eolien and the AMIL (Anti-icing Materials International Laboratory), numerous studies have been conducted to avoid this problem. In this paper we made use of these studies to simulate a test case of icing around a cylinder as described in Lozowski et al. [1]. We emphasize on the fact that these studies cannot provide very accurate local results due to numerous simplifications. We, therefore, developed at the WERL an interactive interface to simulate the trajectory of water droplets in an airstream until collision on a cylinder. This interface is based on MS-Excel worksheets supported with VBA code (Visual Basic for Applications) using a fourth order Runge-Kutta resolution scheme. The interface provides flexibility to demonstrate various scenarios that can help to validate the subsequent evaluation of collection efficiency based on multiphase CFX simulation.

Index Terms: Wind energy, Icing, Ice accretion Modeling

I. NOMENCLATURE

| | | |
|---|--|------------------------------|
| A Area of an element, m^2 | h Plant's constant | T Temperature $^{\circ}K$ |
| e Energy per unit mass, J/kg | ϑ Elementary Volume, m^3 | Q Quantity of heat, J/kg |
| ρ_a Air density in kg/m^3 | ρ_d Water droplet density in kg/m^3 | C_D Drag coefficient |
| g Gravity constant | \mathcal{N} Flow circulation | R Cylinder radius |
| $v_{ax}, v_{ay}, v_{dx}, v_{dy}$ Velocity components of air and droplets respectively | | |

F. Martini, D. Ramdenee, A. Ilinca, Université du Québec à Rimouski,
G5L 3A1, Canada, (e-mail: {fahed.martini@uqar.ca}, {dreutch@hotmail.com}, {adrian_ilinca@uqar.ca}).
H. Ibrahim, TechnoCentre éolien, 51 ch. de la mine, Murdochville, QC,
G0E 1W0, Canada, (e-mail: hibrahim@eolien.qc.ca).

II. INTRODUCTION

Icing is a complex problem. Many fields of knowledge have to be conducted when modelling ice accumulation such as meteorology, statistics, fluid dynamics and thermodynamics [2]. Since the study of icing on a cylinder is the fundamental in several areas of icing research, calculations of the local collection over a cylinder can be used as primary approximation of ice accretion on other objects [1]. The methodology consists of first achieving verified icing simulations on a cylinder, then switching to a three-dimensional simulation of rotating wind turbine blades. The main objective is to develop numerical tools to simulate the ice accretion to be applied to evaluate the impact of icing on the performance of wind turbines and to optimize de-icing techniques. Predicting the shape of ice is based on successive calculations of the airflow around the object, the trajectories of the super-cooled water droplets, mass and energy balance on the surface of the object and then the accumulated mass of ice. One of the preliminary steps is to estimate the collection efficiency which is a measure of the total water collected by the object. Through this work, we wish to verify the transport equations and forces acting on a water droplet, to be further used in the verification of an ANSYS-CFX based Eulerian approach simulating multiple droplets transport and impingement efficiency that will make part and parcel of the whole ice accretion model that is being developed at the WERL. Experimental results of ice accretion on a cylinder are also available for the validation.

III. USE OF PANEL METHOD

The Lagrangean modelling of water droplets will validate potential flow calculation made using the panel method. Flow study on a 2D airfoil is divided into two distinct parts: calculation of the potential (non viscous) flow, using the panel method and the viscous flow calculation within the boundary layer using potential flow results. The Hess and Smith panel method is used to calculate the potential flow [9]. This method gives interesting results namely in the determination of the velocity field and the streamlines near the leading edge. These data play an essential role in the calculation of the trajectories and the impact points of the supercooled water droplets. The assumptions applied to calculate the potential flow by the Hess and Smith's panel method was that the flow is irrotational, non-viscous and incompressible. Hess and Smith's method consists in dividing the profile in a certain number of panels in order to approach the profile's contour to the best. Sources and sinks, called singularities, are distributed on each panel to model the flow. The intensity of each sinks is the same on each panel whereas the intensity of the sources depends on the panel. The intensity of all the singularities is determined by imposing certain limit conditions: the flow must be tangent to each panel and the velocity tangent to the two panels at the trailing edge need to be equal (Kutta condition). The velocity field, the pressure coefficients, as well as the lift and drag coefficients are found from the singularity values. The profile discretisation used in the panel methods consists in replacing the profile by a polygon of N sides. The profile surface is, hence, divided in N panel as shown in figure 1 below:

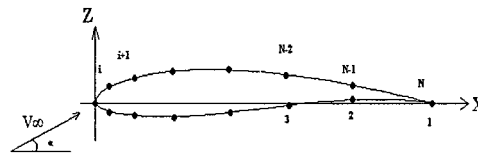


Figure 8 : Discretisation of the aerodynamic profile

The nodes are numbered from 0 to N and the panels from 1 to N . The panel numbered i is formed from

nodes $i-1$ and i . A larger number of panels need to be defined at the leading and trailing edge due to more pronounced curvatures. A cosinusoidal distribution of the panels is thus used:

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{c}{2} (1 - \cos\theta_i) \\ \theta_i &= i\Delta\theta \\ \Delta\theta &= \frac{2\pi}{N} \end{aligned}$$

Where x_i represents the abscissa of the node in the principal coordinates (X, Z) and defined in figure 1. θ_i is the angle subtended by the vector \overrightarrow{Ox} and the vector $\overrightarrow{OM_i}$ (M_i being the point representing the node i), c being the chord of the profile, and N is the number of panels of the profile. The next step resides in the superposition of the flow potentials to find the total potential of the flow at the control point (x_i, z_i) and is given by [9] :

$$\phi(x_i, z_i) = V_\infty (x \cos \alpha + z \sin \alpha) + \sum_{j=1}^N \int \left[\frac{\sigma_j(s)}{2\pi} \ln r_j - \frac{\gamma_j(s)}{2\pi} \theta_j \right] ds$$

In order to obtain the velocity components at all points in the principal coordinates, the singularities need to be solved for; this include a) the calculation of the induced velocity by the uniform flow considered alone, b) the calculation of the induced velocity by a source considered alone, whose intensity is uniformly distributed along the length of the panel, j , c) the induced velocity by a vortex, considered alone, whose intensity is uniformly distributed along the length of the panel, j , d) the application of tangency conditions as boundary conditions and e) the use of Runge-Kutta to solve for tangential velocities using matrices. The pressure coefficients are then calculated as:

$$C_p(i) = \frac{p(i) - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} V_\infty^2} = 1 - \frac{U_e(i)^2}{V_\infty^2}$$

For $U_e(i)$ being the tangential velocity. When the singularities are known, the velocity components at all points are in the principal axis and:

$$U(x_i, z_i) = V_\infty \cos(\alpha) + \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_j}{2\pi} \left(\left(\ln \left(\frac{r_{j-1}}{r_j} \right) \cos\beta_j - (\theta_j - \theta_{j-1}) \sin\beta_j \right) \right) + \frac{\gamma}{2\pi} \sum_{j=1}^N ((\theta_j - \theta_{j-1}) \cos\beta_j + \ln \left(\frac{r_{j-1}}{r_j} \right) \sin\beta_j)$$

and

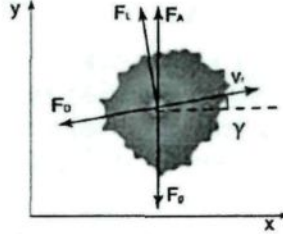
$$W(x_i, z_i) = V_\infty \sin(\alpha) + \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_j}{2\pi} \left(\left(-\ln \left(\frac{r_{j-1}}{r_j} \right) \sin\beta_j + (\theta_j - \theta_{j-1}) \cos\beta_j \right) \right) + \frac{\gamma}{2\pi} \sum_{j=1}^N ((\theta_j - \theta_{j-1}) \sin\beta_j - \ln \left(\frac{r_{j-1}}{r_j} \right) \cos\beta_j)$$

In order to validate the possibility of calculating velocity potential, streamlines, velocity speeds and the efficiency of the Runge-Kutta method, the Lagrangean method to simulate the transport of one droplet of super-cooled water until its impingement on a cylinder was made use of.

IV. LAGRANGEAN APPROACH THEORY

The Lagrangean approach models the movement of a super-cooled water droplets in an airstream. Therefore, we need to define the different forces acting on the droplet. We should, also, model the different equations of motion, the effect of the cylinder on the droplet speed, the constraints due to boundary conditions and the application of the fourth order Runge Kutta resolution scheme. Water particle is assumed to be spherical, rigid and having a radius smaller than 500 microns. This allows us to define a volume for the particle while the aerodynamic characteristics are assumed constant as the droplet is assumed non deformable. Furthermore, supposition is made that the water droplets do not interact between them. This is essential; else, the modelling would have been highly complex. On one hand, chaos theory should have been used in order to define collision between the particles and on the other hand, additional forces (Van der Waals, coalescing forces, etc) should have been further modelled. In real life, the motion of water droplets in an airstream would

have disturbed the airflow as such. However, in the Lagrangean approach we neglect this effect. Furthermore, we consider that the spherical water droplet cannot rotate and is subjected to no pitching effects [2]. The motion of the particle is analyzed as a point mass which reacts with the potential flow without affecting it. The forces acting on the particle, as illustrated in figure 1 are: the forces of gravity, F_g in N, the Archimedes force, F_A in N, the lift force, F_L in N and the drag force, F_D in N.



1. Fig.1. Forces acting on the water droplet
 v_r is the relative velocity of the water droplet with respect to airflow.

The equations of motion for a particle are derived from the equilibrium of forces on a point mass. If we consider the equilibrium of forces in the horizontal axis, we note that the net acceleration by the water particles is the consequence of the resultant force between the horizontal components of the drag and lift forces. If we define γ as the angle subtended by the drag force and the horizontal axis, the equilibrium of forces in the horizontal axis can be expressed as follows:

$$\sum F_x = m_d \cdot a_{dx} + F_D \cdot \cos \gamma + F_L \cdot \sin \gamma = 0$$

Similar analysis in the vertical axis, allows us to define the resulting vertical acceleration on the water droplet as being equal to the resultant of the vertical components of the drag and lift forces and the forces of Archimedes and gravity. The equilibrium of forces in the vertical axis is expressed as follows:

$$\sum F_y = m_d \cdot a_{dy} + F_D \cdot \sin \gamma - F_L \cdot \cos \gamma + F_g - F_A = 0$$

Suffix "a" refers to air and suffix "d" refer to water droplet.

- d_d is the diameter of the water droplet.
- v_d is the volume of the water droplet and is expressed as $v_d = \frac{1}{6} \pi d_d^3$.
- The force of gravity is, hence, expressed as, $F_g = \rho_d v_d g$
- A_T is the cross section area of the sphere and is expressed as: $A_T = \frac{1}{4} \pi d_d^2$
- The lift force acting on the spherical water droplet is given by $F_L = \frac{1}{2} \rho_a A_T C_L |v_r| \vec{v_r}$
- The drag force acting on the spherical water droplet is given by $F_D = \frac{1}{2} \rho_a A_T C_D |v_r| \vec{v_r}$

We consider figure 2 below to make the relative velocity analysis. v_d represents the velocity of the water particle and v_a , the velocity of the air flow. We define v_{dx} as the horizontal component of the water droplet velocity and v_{dy} as the vertical component. Similarly, v_{ax} and v_{ay} stand for the horizontal and vertical velocity components of the airstream velocity respectively. We define γ as the angle subtended by the relative velocity v_r and the horizontal axis.

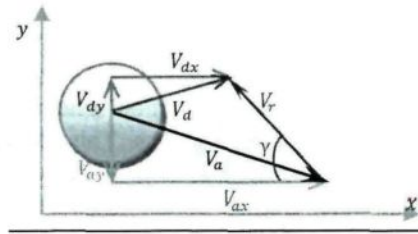


Fig.2. Vector diagram of velocities

Therefore,

$$\begin{aligned}\vec{v}_d &= \vec{v}_a + \vec{v}_r \\ v_{rx} &= v_{dx} - v_{ax} \quad \& \quad v_{ry} = v_{dy} - v_{ay} \\ |v_r| &= \sqrt{(v_{dx} - v_{ax})^2 + (v_{dy} - v_{ay})^2}\end{aligned}$$

Where

$$v_{dx} = \frac{dx_d}{dx} = \dot{x}_d \quad \& \quad v_{dy} = \frac{dy_d}{dy} = \dot{y}_d$$

Therefore,

$$a_{dx} = \frac{dv_{dx}}{dt} = \ddot{x}_d \quad \& \quad a_{dy} = \frac{dv_{dy}}{dt} = \ddot{y}_d$$

Reynolds number (Re) used for the calculation of drag coefficient is based on the magnitude of the relative velocity of water droplet $|v_r|$, the sphere diameter equivalent of water droplet d_d and the kinetic viscosity of air ν_a :

$$Re_d = \frac{d_d}{\nu_a} \sqrt{(v_{dx} - v_{ax})^2 + (v_{dy} - v_{ay})^2}$$

By substituting the above terms in the x, y axis equilibrium equations respectively, the rate of variation of the horizontal and vertical components of the water droplet velocity is expressed respectively as follows:

$$\frac{dV_{dx}}{dt} = K_1(V_{dx} - V_{ax}), \quad \frac{dV_{dy}}{dt} = K_1(V_{dy} - V_{ay}) + K_2$$

Where:

$$K_1 = \frac{CD \cdot Re}{24K_d}, \quad K_2 = K_g \cdot g, \quad K_g = \frac{\rho_a}{\rho_d} - 1$$

The droplet drag coefficient is assumed to be equal to the drag coefficient of a sphere. Many empirical relations were developed to approximate the drag coefficient of a sphere. Clift and Gauvin in 1970 developed a simple relation valid for droplet Reynolds numbers below 300 000 [3]:

$$C_D = \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15 Re_d^{0.687}) + \frac{0.42}{1 + 42500 Re_d^{-1.16}}$$

It is found that due to the very small diameter of the water droplet, a Cunningham correction factor must be applied to the drag coefficient. This is because the drag coefficient of water droplets with a diameter smaller than 10 micrometers is inferior to that calculated using empirical correlation, as the determined ratio between the diameter of the water droplets and the mean distance between air molecules is small enough for slip phenomenon of the molecules to be present [4].

Flow around an object or the velocity field can be calculated by several methods. The choice of the method mainly depends upon the desired accuracy. For a fixed cylinder, for example, the velocity field (radial and tangential velocities) are calculated from equipotential lines. For a rotating cylinder, we make use of a streamlines. Equations of motion are impossible to solve for except if the nodal components of the air flow vector are known, thus, calculations for the air flow is a prerequisite to the calculation of water droplet trajectory modelling. The stream function for a fixed cylinder is given by the following equation [5]:

$$\psi = V_\infty \sin \theta \left(r - \frac{R^2}{r} \right); \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

Or,

$$\psi = V_\infty y \left(1 - \frac{R^2}{x^2 + y^2} \right) \quad \text{and} \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -V_{ay}, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = V_{ax}$$

Hence,

$$V_{ax} = V_\infty \left[1 + \left(R^2 \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} \right) \right]$$

$$V_{ay} = -2V_{\infty}R^2 \frac{y \cdot x}{(x^2 + y^2)^2}$$

If a rotating cylinder was made use of, the streamline function would have been written as:

$$\psi = U_{\infty} \left(r - \frac{d^2_c}{4r} \right) \sin(\theta') + \frac{\kappa}{2\pi} \ln(r)$$

The radial velocity of the flow for a rotating cylinder is defined as:

$$V_r = \frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = U_{\infty} \left(1 - \frac{d^2_c}{4r^2} \right) \cos(\theta')$$

The tangential velocity of the flow for a rotating cylinder is defined as:

$$V_{\theta} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = -\frac{\partial \psi}{\partial r} = -U_{\infty} \left(1 + \frac{d^2_c}{4r^2} \right) \sin(\theta') - \frac{\kappa}{2\pi r}$$

V. SOLUTIONS OF THE DIFFERENTIAL EQUATION

Analytical resolution of equations of motion is not possible. Numerous numerical solution schemes exist aiming at resolving ordinary differential equations with boundary conditions [6]. Runge Kutta methods are highly used due to their relative advantages in solving ordinary differential equations as numerical methods. They are often called single step methods since they can advance solution from x_n to x_{n+1} without needing to know the solutions at x_{n-1}, x_{n-2} , etc. The advantages of Runge Kutta methods are that they are easy to implement, they are very stable and are self starting (i.e, unlike multi-steps methods, we do not have to treat the first few steps taken by a single step integration). However, Runge Kutta methods have some weaknesses like they require significantly more computer time than multi step methods for comparable accuracy. This is not a very serious issue as the application herein is relatively simple such that computational capacity is not a limiting factor. In our case, we make use of a fourth order Runge Kutta method. Runge-Kutta 4th order method is a numerical technique used to solve ordinary differential equation of the form:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), y(0) = y_0$$

The Runge-Kutta 4th order method can be expressed by the following form:

$$y_{i+1} = y_i + (a_1k_1 + a_2k_2 + a_3k_3 + a_4k_4)h, \quad h = x_{i+1} - x_i$$

The incremented y value equation is equated to the first five terms of Taylor series

$$y_{i+1} = y_i + \frac{dy}{dx} \Big|_{x_i, y_i} (x_{i+1} - x_i) + \frac{1}{2!} \frac{d^2y}{dx^2} \Big|_{x_i, y_i} (x_{i+1} - x_i)^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3y}{dx^3} \Big|_{x_i, y_i} (x_{i+1} - x_i)^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4y}{dx^4} \Big|_{x_i, y_i} (x_{i+1} - x_i)^4$$

Or

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)h + \frac{1}{2!} f'(x_i, y_i)h^2 + \frac{1}{3!} f''(x_i, y_i)h^3 + \frac{1}{4!} f'''(x_i, y_i)h^4$$

Based on the two previous equations, one of the popular solutions used is

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h$$

Where:

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1h\right)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_2h\right)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + k_3 h)$$

The numerical simulation has been realized using MS-EXCEL supported with VBA code based on the above mentioned method of Runge- Kutta and taking into account the following considerations while choosing the boundary conditions:

The magnitude of the air speed is in the order of tens of metres per second. Therefore, it would be appropriate to take as boundary condition in a given scenario the displacements as a percentage of the diameter of the cylinder, d_c . Therefore,

Water droplet initial horizontal position: $X_0 = -10d_c$

Water droplet initial vertical position: $Y_0 = -0.5d_c$

The time step is taken as $\frac{d_c}{v_\infty}/10$

The simulation is made on 0.1 second such that $T_{\text{initial}}=0\text{s}$ and $T_{\text{final}}=0.1\text{s}$. The simulation must be ceased at the interception with the cylinder. Interception criterion can be verified using the radius of the cylinder R ; if: $\sqrt{x^2 + y^2} \leq R$, then water droplet has passed over the cylinder.

VI. MS-EXCEL WORKBOOK STRUCTURE

The Excel based program has as advantage to provide a very user friendly interface and flexibility. The step-size can be changed as desired without any complications for higher-order schemes. With an Excel interactive spreadsheet, we do not have to compile, build, and link as in a regular FORTRAN code. In addition, the graphics are immediately displayed after the computations are completed, so that the results are seen quickly and changes in the input can be made [7].

The main Excel worksheet contains the general relevant parameters needed for calculations; it specifies the initial conditions of the simulation, atmospheric conditions and precipitation data and droplets and geometry information. Furthermore, the initial conditions, like initial speed, initial distance, etc. are also defined. The time step, number of iterations and other simulation numerical parameters are defined to solve the application using the Runge Kutta algorithm. The Excel based application solves for the different velocity components, distances, etc. at each time step. The VBA code enables the illustration of the y displacement as a function of the x displacement of the water droplet.

For our application we use the following parameters and conditions as illustrated in below:

| | |
|--|--------------------------------|
| Atmospheric pressure | 1.01325 e ⁵ Pa |
| Ambient temperature | 288.16 K |
| Heat coefficient at constant pressure, c_p | 1005 J/ kgK |
| Heat coefficient at constant volume, c_v | 717.98 J/ kgK |
| Precipitation | 2.8 mm/ hr |
| Liquid water content, LWC * ¹ | 8 g/ m ³ |
| Diameter of water droplet MVD * ² | 3.13779x 10 ⁻⁵ m |
| μ of air (the dynamic viscosity) | 1.8 x 10 ⁻⁵ kg/ m.s |
| Diameter of the cylinder | 0.02 m |
| Density of water | 1000 kg/ m ³ |
| μ of air (the dynamic viscosity) | 1.69 x 10 ⁻⁵ |
| Unperturbed velocity | 10 m/s |

*¹ LWC: Liquid water Content: calculated as $\frac{1000\rho \cdot (\text{precipitation})}{3600000 \cdot V_t}$ [2]

*² MVD: Median Volumetric Diameter of water droplet

The velocity of air, v_a is calculated as: $V_a = \sqrt{V_{ax}^2 + V_{ay}^2}$

The x and y components of air velocity, V_{ax} and V_{ay} are expressed as follows:

$$V_{ax} = V_{\infty} \left[1 + \frac{R^2(y^2 - x^2)}{(y^2 + x^2)^2} \right] \quad \text{and} \quad V_{ay} = \frac{-2V_{\infty}R^2xy}{(y^2 + x^2)^2}$$

Where V_{∞} is the unperturbed velocity.

The x component of droplet's velocity is calculated as: $V_{dx} = 0.99 V_{ax}$

The y component of droplet's velocity is calculated as: $V_{dy} = 0.99 V_{ay}$

The velocity of water droplet, V_d , is hence,

$$V_d = \sqrt{V_{dx}^2 + V_{dy}^2}$$

The relative velocity, V_r , of the water droplet with respect to the airstream velocity is calculated as follows:

$$V_{rx} = V_{ax} - V_{dx} \quad \text{and} \quad V_{ry} = V_{ay} - V_{dy}$$

$$\text{Where: } V_r = \sqrt{V_{rx}^2 + V_{ry}^2}$$

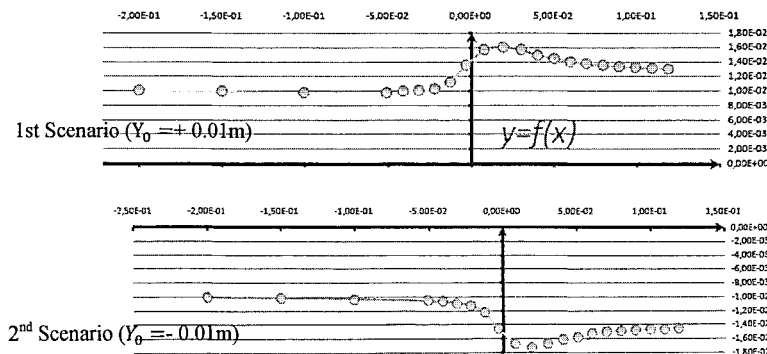
The programmed Runge Kutta algorithm in interaction with the Main Excel spreadsheet resolves, in an iterative manner, the displacement and velocities of the water droplet and air stream at each time step. The y displacement of water droplet with respect to the x displacement, along with the trajectory of water droplet from its initial position till the interception with the cylinder is illustrated on a separated worksheet. Since the percentage of water droplet diameter to the diameter of cylinder is very small, the program proposes a zoom in near the cylinder area to better visualize the impingement or the trajectory of the water droplet in the vicinity of the cylinder. Other sheets graphically illustrate the variation of airspeed and other droplet velocity with respect to the x axis, starting at initial distance X_0 till interception with the cylinder.

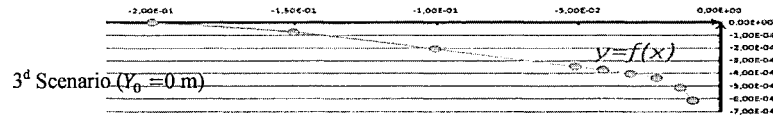
VII. SCENARIOS OF SIMULATION, RESULTS & DISCUSSION

Many Scenarios has been conducted to verify the performance of the program changing the initial conditions, time steps and or droplet's initial position. The following three examples have been discussed:

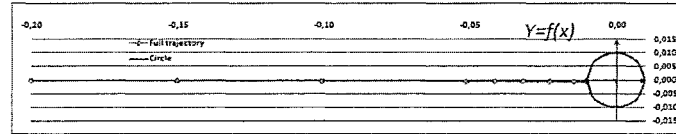
| | 1 st Scenario | 2 nd Scenario | 3 ^d Scenario |
|--------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| V_{∞} | 10 m/s | 10 m/s | 10 m/s |
| d_c | 0.02 m | 0.02 m | 0.02 m |
| X_0 | -0.2 m | -0.2 m | -0.2 m |
| Y_0 | -0.01m | +0.01m | 0 m |

Figures 3 to 5 illustrate some graphical results of the three scenarios for each droplet initial vertical position Y_0 .

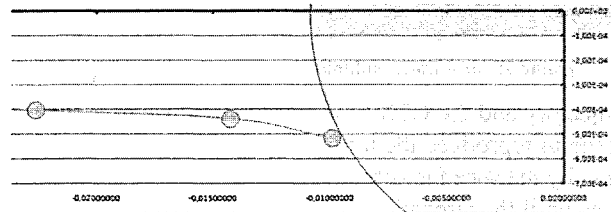




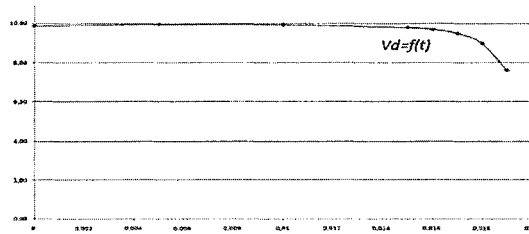
Figures 3: the trajectory of the water droplet for the three scenarios



Figures 4: the whole trajectory of the water droplet in the third scenario till interception with the cylinder



Figures 5: the trajectory of water droplet in the third scenario zoomed in the vicinity of the cylinder



Figures 6: water droplet velocity in the third scenario

We note from figure4 that the droplet deviates from its trajectory as it approaches the cylinder, the streamline follows a near asymptotic trajectory to the cylinder curvature; this is due to the current function of the object that intercepts with the streamlines. If the droplet doesn't intercept with the cylinder, as in the first and second scenario, it will circumvent the cylinder following the streamlines. We can note in the second scenario that there is a slight drop in the trajectory; we can only attribute this to the vector sum of the vertical force components acting on the water droplet. This equals to the sum of the resultant between the force of gravity and the Archimedes force and the vertical component of the drag force. In the third scenario in which, initially the y position of the droplet was aligned with the centre of the cylinder, the simulation stopped when the droplet touches the cylinder, this interception is illustrated in figure 4 and 5. In figure 6 we see a short-lived acceleration in the water droplet speed initially. This can be explained by the inertia of the droplet such that this corresponds to the change of momentum phase in the airstream. Then the speed decreases due to the vector sum of the horizontal components of the drag and lift forces. However, this speed reduction is less significant the inertia of the water droplet is higher than the air molecules. Finally, the same acceleration was obtained later in the wake recirculation zone of the cylinder. To evaluate the airstream, ANSYS – CFX was made use of a multiphase flow which contains air and a liquid water fraction of $1\text{g}/\text{m}^3$. The airstream unperturbed velocity was 10 m/s . The obtained streamlines are illustrated in figure7. We note that streamlines far from the cylinder pass straight without showing any interaction with the cylinder. The closer the streamlines are with the cylinder, the more affected they are by the presence of the cylinder. We note separation zones near the cylinder and impingement regions very close to the solid. In the wake of the cylinder, we can see recirculation zones that can significantly affect the trajectory of the water droplet near the cylinder zone. Furthermore, we can see that the colour of the streamlines define the velocity of the

airstream at different locations. In the vicinity of the cylinder that the colour lightens then darkens again. This shows that the airstream is initially retarded and then accelerated again as it passes along, very close to the cylinder.

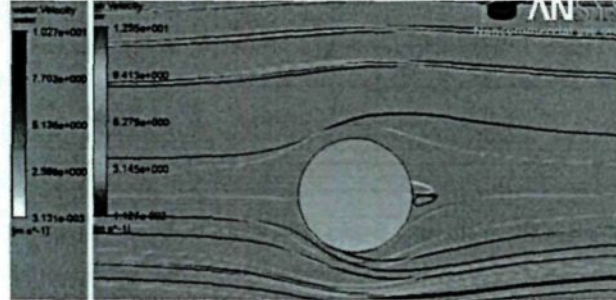


Figure 7: Air – water multiphase velocity simulation on CFX

In both the Excel based trajectory and the CFX based simulation, we note that in the wake of the cylinder, the streamlines tend to converge to reproduce the initial stream. Thus a point of inflexion is found soon after the centre of the cylinder, whereby the speed is accelerated in the wake and the y value decreases (or increases) as the x displacement increases until the streamline becomes parallel to the initial flow. We can again notice that the qualitative trajectory is in line with simulated streamlines and forces acting on the droplet.

As for figure 6, we note that the droplet velocity decreases as the x displacement increases in the upstream of the cylinder. This is because retardation forces consisting of the horizontal components of the drag and lift forces decelerate the airstream as well as the water droplet. This is, also, visible through the lightening of the colour in the CFX simulation of the streamlines in the upstream of the cylinder, which corresponds to a decrease in the speed. Beyond the cylinder, the streamlines tend to narrow on one another such that acceleration is produced in the wake and recirculation zone. This is well illustrated in both the CFX and Excel based simulation.

VIII. CONCLUSION

It is very difficult to assert the exactness of the model as no experimental or other models pondering on water droplet trajectory in an airstream have been found in literature. Therefore, it is very difficult to quantitatively affirm the accuracy of the model. However, it should be noted that the trajectory of the water droplets depends on the airstream flow and the forces acting on the droplet. We can, hence, see that this model correctly predicts the water droplet trajectory on a qualitative basis. However, in order to ensure accurate results, the time step and the number of iterations need to be refined as the water droplet approaches the cylinder in the major ice accretion modelling.

We note that the Lagrangian approach simulates the trajectory of a water droplet in an airstream. However, the simulation correctly illustrates the general trend of the trajectory but does not take into account several aspects like the interaction with other droplets, vorticity, rotation of the droplet and others. Furthermore, the flow does not include diffusive, convective and viscous dissipation effects that might infer upon the flow regime and the water droplet trajectory. This Lagrangian approach can be used in a further model, whereby several droplets could be simulated at once, and the Van der Waals forces taken into account. The number of incident droplets per unit time can be evaluated, the thermodynamics and phase change equations applied on each droplet at a time and the process repeated iteratively to model ice accretion on the cylinder or other geometries.

IX. REFERENCES

- [13] Lozowski, E. P., Stallabrass, J. R., & Hearty, P. F. , 1983. The Icing of an Unheated Non Rotating Cylinder. *Journal of climate and applied meteorology*.
- [14] Fortin, G., 2009. *Thermodynamique de la glace atmosphérique*. UQAC.
- [15] G. Fortin, J. Perron, *Wind Turbine Icing and De-Icing*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009
- [16] Carlson, D. J. and Haglund, R. F., Particle Drag and Heat Transfer in Rocket Nozzles, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 2, No. 11, pp. 1980-1984, 1964
- [17] Anderson, J. D. (2007). *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill
- [18] Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2005). *Numerical Methods for Engineering*. Mc-Grow Hill.
- [19] E. Urip, S. Y. (2002). *An Interactive Excel Program for Tracking a Single Droplet in Crossflow Computation*.
- [20] ANSYS CFX, Release 12.0.
- [21] Fortin, G. (2003). *Simulation de l'accrétion de glace sur un obstacle bidimensionnel par la méthode des bissectrices et par la modélisation des ruisselets et des gouttes de surface*. Thèse du doctorat en ingénierie. Chicoutimi, Québec, canada: Université du Québec à Chicoutimi.

CHAPITRE 4

CONCLUSION GÉNÉRALE

4.1 BILAN ET AVANCEMENT DES CONNAISSANCES

Le givrage est une évolution physique complexe de l'eau en surfusion et de sa transformation en glace. L'eau en surfusion est un état métastable qui exige des études approfondies de transfert de chaleur et de masse pour bien analyser le phénomène de solidification et de l'accumulation de glace sur un obstacle. La complexité physique du phénomène, le manque de résultats expérimentaux sur le givrage des éoliennes et les coûts élevés des essais rendent très utile une approche basée sur des simulations numériques tridimensionnelles. L'approche numérique avancée doit cependant être suffisamment précise pour bien quantifier les effets du givrage sur les éoliennes dans diverses conditions météorologiques.

Pour pouvoir utiliser un programme informatique aussi puissant soit-il pour effectuer une simulation tridimensionnelle du givrage sur des pales des éoliennes en rotation, plusieurs études préliminaires basées sur des relations empiriques doivent être menées afin de raffiner les paramètres du modèle mathématique décrivant le phénomène. Les ressources informatiques significatives des simulations en trois dimensions à l'aide d'un modèle complexe, qui représente avec précision les phénomènes physiques rencontrés, imposent la calibration et la validation préliminaires avec des cas de calculs plus simples pour lesquels des résultats comparables sont disponibles. Mêmes ces approximations peuvent conduire à des limitations sérieuses du modèle, particulièrement avec un régime humide.

Les logiciels CFD commerciaux utilisent des modèles mathématiques pour les calculs des écoulements turbulents, multiphasiques, avec transfert de chaleur et de masse. Dans cette étude, des nouvelles techniques de simulation ont été appliquées pour déterminer les paramètres d'utilisation de ces logiciels commerciaux dans la recherche sur le givrage des éoliennes. Nous avons validé un logiciel CFD commercial sur un cas test de simulation de l'accumulation de glace sur un cylindre dans le but de généraliser par la suite son utilisation à la simulation en 3D de l'accumulation de glace sur les éoliennes.

Le mémoire est composé de deux articles dont le premier présente les études théoriques de l'accumulation de glace autour d'un cylindre en appliquant une approche Eulérienne basée sur les outils de modélisation multiphasique (eau dans l'air) d'ANSYS-CFX. Dans l'article, nous avons mis l'accent sur la modélisation de l'écoulement turbulent et de la fraction volumétrique d'eau jusqu'à l'impaction avec le cylindre et l'extraction des résultats de l'efficacité de collection locale de l'accrétion de glace sur un cylindre fixe. Ces résultats ont été validés avec les résultats d'une approche Lagrangienne et celles d'une approche Eulérienne, ainsi qu'avec des résultats expérimentaux. Les résultats pourront servir dans un autre projet pour la modélisation de l'accrétion de glace en appliquant des modèles de transfert de chaleur et de masse.

Dans cette étude, nous avons analysé les modèles aérodynamiques et multiphasiques de CFX permettant la modélisation des écoulements turbulents et de la fraction volumique d'eau dans chaque volume de control du domaine de simulation. De plus, nous avons défini les paramètres intrinsèques qui peuvent affecter l'efficacité de collection, telles que le diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau MVD, la teneur en eau liquide LWC, etc. En outre, nous avons analysé l'influence du domaine de calcul, du maillage, du modèle de turbulence et du modèle de transfert de chaleur. Parallèlement, cette application a été comparée avec des calculs des trajectoires des gouttelettes d'eau qui ont fait l'objet du deuxième article.

Pour interpréter le comportement des gouttelettes d'eau dans l'air lorsqu'elles rencontrent un objet, nous avons développé une interface interactive pour simuler les

trajectoires des gouttelettes d'eau dans un écoulement d'air interceptées par un cylindre. Le modèle mathématique est construit à partir des équations différentielles de mouvements et des calculs de l'écoulement. L'interface utilise des feuilles de calcul Excel prises en charge avec un code VBA (Visual Basic pour Applications) et utilise la méthode numérique Runge-Kutta d'ordre quatre (RK4) pour résoudre les équations différentielles du mouvement. Cette interface conviviale de MS-Excel offre la flexibilité et la simplicité d'utilisation et démontre facilement les différents scénarios pouvant aider à calculer la déflexion des gouttelettes d'eau dans l'écoulement d'air et à déterminer le coefficient local de collection par une méthode Lagrangienne ainsi qu'à valider des simulations basées sur la modélisation multiphasique de CFX. Le modèle a été fait aussi générique que possible afin que les paramètres puissent être changés facilement si nécessaire. Plusieurs scénarios ont été effectués avec ce modèle. Cependant, il est très difficile d'affirmer l'exactitude du modèle car aucun modèle expérimental ou autre comparable n'a été trouvé dans la littérature. Cette simulation basée sur le suivi de trajectoire d'une gouttelette d'eau dans un écoulement d'air n'a pas été validée auparavant, ce qui fera de ce travail une originalité et une contribution dans le domaine de la simulation de l'accrétion de glace. Toutefois, nous avons fait une simulation semblable avec CFX et nous avons trouvé que les lignes de courant suivent qualitativement les trajectoires analysées obtenues suite à cette simulation, et qu'ils correspondent bien au bilan des forces agissants sur la gouttelette d'eau en mouvement. Cette approche peut être utilisée dans un modèle ultérieur, où plusieurs gouttes peuvent être simulées à la fois, et les forces de Van der Waals prises en compte. Le nombre de gouttelettes incidentes par unité de temps peut être évalué, la thermodynamique et les équations de changement de phase appliquées sur chaque gouttelette à la fois et le processus se répète de manière itérative pour simuler l'accumulation de glace sur un cylindre ou sur d'autres géométries.

4.2 LIMITATIONS DE LA RECHERCHE

Du fait de nombreuses simplifications, ces études ont des limitations considérables. Nous avons pris le cas le plus simple pour pouvoir valider le modèle avec les études théoriques. Le modèle de CFX est construit pour un cylindre fixe avec une rugosité minimale dans un écoulement visqueux, turbulent, stationnaire et bidimensionnel. Les deux articles abordent les contraintes qui limitent l'efficacité des modèles utilisés et leur représentativité, ce qui s'est traduit par des écarts non négligeables dans les résultats obtenus par rapport à ceux réellement attendus. Ceci s'explique par les diverses hypothèses simplificatrices qui étaient prises en compte lors de la modalisation et la simulation de l'accrétion de glace. Dans des études ultérieures, telles limitations devraient être prises en considération successivement avant de passer à des simulations plus compliquées, des exigences informatiques sont prévus avec. Des plateformes très puissantes sont nécessaires pour répondre aux besoins de modélisation des écoulements tridimensionnels instationnaires avec transfert de chaleur.

4.3 TRAVAUX FUTURS

Ce travail représente un point de départ pour parvenir à une simulation numérique tridimensionnelle de l'écoulement de l'air et de l'accrétion de la glace autour des pales d'éolienne pour estimer leurs modifications géométriques et pour déterminer ultérieurement les conséquences aérodynamiques et l'impact sur la production énergétique des éoliennes. Subséquemment, il serait utile d'appliquer ces modèles informatiques pour des conditions météorologiques spécifiques et établir des diagrammes de l'intensité de givrage pour les pales des éoliennes existantes afin d'évaluer l'impact total du givrage sur un site éolien.

La phase suivante du projet sera la mise en œuvre et la programmation des paramètres du modèle aérodynamique et thermodynamique pour estimer l'épaisseur de la glace accumulée dans les deux régimes; sec ou humide. Le développement et la validation

peuvent être réalisés pour un profil de pale bidimensionnel à partir des résultats déjà vérifiés, comme celle du code CIRA-LIMA.

ANSYS-CFX fournit plusieurs outils informatiques pour introduire des codes définis par l'utilisateur en utilisant les langages informatiques : CEL (CFX Expansion Language) et le FORTRAN avec l'interface *User Junction Box Routines*. Également, il est possible de relier le solveur de CFX avec d'autres plateformes; comme les logiciels de modélisation géométrique (CAO) et les tableaux Excel. Ceci permet de relier ensemble, d'une façon automatisée, les simulations successives et de mettre à jour les déformations géométriques dues au givrage. Ces techniques sont efficaces et elles devraient être adaptées pour pouvoir simuler en 3D le cas le plus général du givrage avec transfert de chaleur sur des pales d'éolienne en rotation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON, J. D. 2007. «Fundamentals of Aerodynamics». McGraw-Hill
- AL-KHALIL, K., Keith, T. G., De Witt, J. K., & Nathman, J. K. 1989. «Thermal Analysis of Engine Inlet Anti-Icing Systems». American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, AIAA 89-0759 .
- ANSYS CFX, Release 12.0.
- BEZOS, G. M. 1992. «Wind Tunnel Aerodynamic Characteristics of a Transport-Type Airfoil in a Simulated Heavy Rain Environment». NASA, Technical Paper 3184.
- BOLUK, Y., 1996. «Adhesion of Freezing Precipitates to Aircraft Surfaces», Transport Canada.
- BOUTANIOS, Z. 1999. «An Eulerian 3D Analysis of Water Droplets Impingement on a Convair-580 Nose and Cockpit Geometry». Concordia University.
- CANWEA 2005, Conference report.
- CARLSON, D. J. and Haglund, R. F. «Particle Drag and Heat Transfer in Rocket Nozzles», American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, Vol. 2, No. 11, pp. 1980-1984, 1964
- CHAPRA, S. C., & Canale, R. P. 2005. «Numerical Methods for Engineering». McGraw Hill.
- DIMITROVA, M. H. 2009. «Pertes énergétiques d'une éolienne à partir des formes de glace simulées numériquement». Rimouski: Université du Québec À Rimouski.
- FIKKE, S. et al. 2006. COST-727, «Atmospheric Icing on Structures: Measurements and data collection on icing». State of the Art. MeteoSwiss.
- FORTIN, G. 2009. «Cours de la thermodynamique de la glace atmosphérique». Program de maîtrise et doctorat en ingénierie, Département des sciences appliquées, Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi.
- FORTIN, G. 2003. «Simulation de l'accrétion de glace sur un obstacle bidimensionnel par la méthode des bissectrices et par la modélisation des ruisselets et des gouttes de surface». *Thèse du doctorat en ingénierie*. Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi.

- FORTIN, G., & Perron, J. 2009. «Wind Turbine Icing and De-Icing». AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, p. 47th .
- FORTIN, G., Hochart, C., Perron, J., & Ilinca, A. 2005. «Caractérisation des conditions météorologique et du givre à Murdochville durant la campagne 2004-2005». Rimouski: Université du Québec À Rimouski.
- HABASHI, W. G., Morency, F., & Beaugendre, H. 2001. «FENSAP-ICE: A Comprehensive 3D Simulation Tool for In-flight Icing». 7th International Congress of Fluid Dynamics and Propulsion. Sharm-El-Sheikh, Egypt.
- HANSMAN, J., & Turnock, S. R. 1988. «Investigation of Surface Water Behaviour During Glace Ice Accretion». American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, AIAA 88-0015 .
- HOCHART, C. 2006. «Simulation numérique et expérimental de l'écoulement d'air et de l'accrétion de glace autour d'une pale d'éolienne». Rimouski: Université du Québec À Rimouski.
- HOCHART, C., Fortin, G., Peron, J., & Ilinca, A. 2007. «Wind Turbine Performance under Icing Conditions». Wiley Intersciences .
- ILINCA, A. 2006. «Demande de subvention. Adaptation des turbines éoliennes à l'exploitation en climat nordique». Rimouski, Québec, CANADA: CRSNG.
- ILINCA, A., & Chaumel, J. L. (2009, March). «Conférence de l'énergie éolienne». École de Technologie Supérieure, Montréal, QC, CANADA: UQAR-ETS.
- ILINCA, A., Fortin, G., & Laforte, J.-L. 2004. «Modèle d'accrétion de glace sur un objet bidimensionnel fixe applicable aux pales d'éoliennes». VERIGO, volume 5, numéro 1.
- ISO-12494, 2001. «Atmospheric Icing of Structures». ISO copyright office, Geneva, Switzerland, pp. 56.
- LÉBATTO, É. B. 2004. «Modélisation en 3-d de l'accumulation de glace sur un cylindre». Chicoutimi: Université du Québec a Chicoutimi.
- LOZOWSKI, E. P., Stallabrass, J. R., & Hearty, P. F. 1983. «The Icing of an Unheated Non Rotating Cylinder». Journal of climate and applied meteorology, volume 22.

- MAYER, C. 2007. «Système électrothermique de dégivrage pour une pale d'éolienne: simulations en soufflerie réfrigérée et impact sur la puissance produite». Rimouski: Université du Québec À Rimouski.
- MAZIN I. P., K. A. 2000. «Thermodynamics of Icing Cylinder for Measurements of Liquid Water Content in Super-cooled Cloud». Journal of atmospheric and oceanic technology, volume 18.
- MESSINGER, B. 1953. «Equilibrium Temperature of an Unheated Icing Surface as a Function of Airspeed». Journal of the Aeronautical Sciences, volume 20, pp. 29-42.
- PARENT, O., Ilinca, A. 2011. « Anti-icing and De-icing Techniques for Wind Turbines – A Critical Review ». Cold Regions Science and Technology, 65(1), p.88.
- PING, F. 2005. «Modelling and simulation of the ice accretion process on fixed or rotating cylindrical objects by the boundary element method». Chicoutimi: Université du Québec a Chicoutimi.
- RAMDENEE, D. et al. 2010. «Numerical simulation of the dynamic stall phenomenon of an s 809 airfoil». Computational fluid dynamics society. London (ON), Canada: West Ontario University.
- RUFF, G. A., & Berkowitz, B. M. 1990. «Users Manual for the NASA Lewis Ice Accretion Prediction Code (LEWICE) ». NASA CR185129.
- SAEED, F. 2003. «Aircraft Icing». Wiley-Interscience Publication.
- SATHYAJITH, Mathew. 2006. «Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics», Springer Edition.
- TARDIF, T. d. 2009. «Modélisation et analyse des phénomènes aéroélastiques pour une pale d'éolienne». Rimouski: Université du Québec À Rimouski.
- TARDIF, T., & ILINCA, A. 2008. « Modélisation de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne». Rimouski: Laboratoire de Recherche en énergie éolienne, Université du Québec À Rimouski.
- URIP, E., Yang, S.L. & Marek, C.J. 2002. «An Interactive Excel Program for Tracking a Single Droplet in Crossflow Computation». NASA TM - 2002-211710.

- VILLALPANDO, F. 2011. «Assessment of turbulence models for flow simulations around a wind turbine airfoil». Modelling and simulation in engineering, volume 2011.
- WIROGO, S., & Srirambhatla, S. 2003. «An Eulerian Method to Calculate the Collection Efficiency on Two and Three Dimensional Bodies». 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada.